



**T.C.**

**ALANYA ALAADDİN KEKUBAT ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KATODİK KORUMA İLE BORULARIN KOROZYONDAN KORUNMASI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Tayfun KARAGÖZ**

**ANTALYA**

**HAZİRAN 2019**



**T.C.**  
**ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATODİK KORUMA İLE BORULARIN KOROZYONDAN KORUNMASI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Tayfun KARAGÖZ**  
**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**  
**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği**

**Danışman**

**Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI**

(HAZİRAN, 2019)

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Tayfun KARAGÖZ



## TEŞEKKÜR

Öncelikle tez konumu belirme sürecince doğru ve bana en uygun konuyu bulmam için gereken yönlendirmelerle bana destek olan sayın rektör hocam Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI hocama, yüksek lisans hayatım boyunca eğitimi sağlayan hocalarıma, tez yazma döneminde desteklerini eksik etmeyen aileme teşekkür ve saygılarımı sunarım.



## ÖZET

### KATODİK KORUMA İLE BORULARIN KOROZYONDAN KORUNMASI

Tayfun KARAGÖZ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Haziran, 2019 (182 Sayfa)

Bu tez çalışmasında boru hatlarında gerçekleşen korozyon olayı irdelenmiş olup önlemler alınmaz ise ülke ekonomisine verdiği zarar ve enerji kaybı anlatılmıştır. Korozyon olayının tüm çeşitlerine yer verilmiş olup gerçekleşme aşamaları gerekli literatür çalışmaları ile detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Zaten kısıtlı olan enerji kaynaklarındaki kayıpları azaltmak için borularda gerçekleşen korozyonun önlenmesi amaçlı bazı çalışmalara yer verilmiş olup gerekli önlemlerin alınması esnasında izlenen aşamalar ve bu aşamalar sırasında karşılaşılabilecek sorunlara yer verilmiştir. Eğer doğru yöntem uygulanmaz ise de karşılaşılabilecek sorunlara yer verilip maddi kayıpların artabileceği gözlemlenmiştir. Katodik koruma uygulamalarının yararlarına ve katodik korumanın kapsamına değinilmiştir. Katodik koruma uygulaması yapılan projelere yer verilip koruma için gerekli olan akım ihtiyaçları belirlenip buna uygun katodik koruma türünün seçimi gerçekleştirilmiş olup sistem kurulumuna değinilmiştir.

Katodik koruma için gerekli tüm elemanlara detaylı bir şekilde değinilmiş olup sistemin ihtiyaç duyduğu tüm elemanların açıklamaları geniş ve anlaşılır bir biçimde yapılmıştır. Ülkemizde ve dünyamızda göz ardı edilemeyecek kadar önemli olan korozyon zararlarının önüne geçebilmek için yapılması gerekenler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Korozyon, Katodik koruma, Galvanik anotlu katodik koruma, Dış akım kaynaklı katodik koruma, Katodik koruma proje.

## ABSTRACT

### PROTECTION OF PIPES FROM CORROSION WITH CATHODIC PROTECTION

Tayfun KARAGÖZ

Department of Material Science and Engineering

Alanya Alaaddin Keykubat University, Graduate School of Science,

June, 2019

In this thesis, the corrosion phenomenon occurred in the pipelines was examined and if precautions are not taken, the damage and energy loss to the country's economy was explained. All varieties of corrosion have been given and the realization phases are explained in detail with the necessary literature studies. In order to reduce losses in energy sources that are already limited, some studies aimed at preventing corrosion occurred in pipes have been taken and the necessary precautions have been followed during these phases and the problems that may be encountered during these phases have been explained. If the correct method is not applied, it has been observed that the material losses could be increased by giving place to the problems that may be encountered. The benefits of cathodic protection applications are mentioned and the scope of cathodic protection is mentioned. Cathodic protection projects have been included and current requirements for protection have been determined and the selection of the type of cathodic protection has been made accordingly.

All the elements needed for cathodic protection have been mentioned in detail and the explanations of all the elements needed by the system have been made in a wide and comprehensible way. In order to prevent these corrosion losses, which are too important to be ignored in our country and in our world, we have explained in detail what to do.

**Keywords:** Corrosion, Cathodic protection, Cathodic protection with galvanic anode, Cathodic protection with external current, Cathodic protection project.

## İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	xvi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR .....	2
2.1. Korozyon.....	2
2.1.1. Korozyon tepkimeleri.....	3
2.1.2. Korozyon hücresi .....	4
2.1.3. Korozyon hız birimleri.....	5
2.2. Korozyon Çeşitleri .....	7
2.2.1. Çukur tipi korozyonu .....	7
2.2.2. Filiform korozyon .....	8
2.2.3. Seçimli korozyon .....	10
2.2.3.1. Çinko fakirleşmesi .....	10
2.2.3.2. Grafitleşme .....	11
2.2.3.3. Çeşitli türlerde gerçekleşen seçimli korozyon olayları .....	12
2.2.3.4. Seçimli korozyonun önlenmesi .....	12
2.2.4. Galvanik korozyon .....	13
2.2.4.1. Galvanik korozyonu etkileyen başlıca faktörler .....	16
2.2.4.2. Galvanik korozyonun önlenmesi.....	17
2.2.5. Erozyon korozyonu .....	18
2.2.5.1. Erozyon tipi korozyona sebep olan etkenler .....	24
2.2.6. Kavitasyon korozyonu .....	27
2.2.7. Fretaj korozyonu .....	29
2.2.7.1. Fretaj korozyonu önleme yolları .....	31
2.2.8. Aralık (krevis, çatlak) korozyonu .....	32



2.2.8.1. Paslanmaz çeliğin aralık korozyonu.....	35
2.2.8.2. Aralık tipi korozyonun önlenmesi.....	36
2.2.9. Homojen korozyon.....	36
2.2.9.1. Homojen korozyonun önlenmesi .....	38
2.2.9.2. Üniform korozyon hızı.....	39
2.2.10. Taneler arası gerçekleşen korozyon .....	39
2.2.10.1. Paslanmaz çeliklerde krom bromür oluşum süreci .....	41
2.2.11. Gerilmeli korozyon .....	42
2.2.11.1. Gerilmeli korozyonun gerçekleşme mekanizması .....	47
2.2.11.2. Gerilmeli korozyonun önlenmesi.....	48
2.2.12. Yorulma tipi korozyon olayı .....	49
2.2.12.1. Yorulma tipi korozyonun önlenmesi.....	53
2.2.13. Hidrojenin sebep verdiği bozulma .....	53
2.2.14. Mikrobiyolojik korozyon türü.....	59
2.3. Korozyondan Korunma Yöntemleri.....	60
2.3.1. Uygun malzeme kullanımı .....	60
2.3.2. Sistemin korozyonu önleyici tasarımı .....	62
2.3.3. Koruyucu kaplama kullanımı .....	63
2.3.3.1. İnorganik kaplamalar .....	63
2.3.3.2. Boya uygulanarak koruma .....	63
2.3.3.3. Metalik kaplamayla koruma.....	64
2.3.3.4. Pe (polietilen) kaplama .....	65
2.3.3.5. Ziftleme .....	66
2.3.3.6. Biyolojik kaplama .....	66
2.3.4. İnhibitörle koruma.....	67
2.3.5. Anodik ve katodik koruma.....	67
2.3.5.1. Katodik ve anodik koruma sistemlerinin kıyaslaması .....	69
2.4. Katodik Koruma.....	71
2.4.1. Katodik koruma sistem mekanizması ve kriterleri.....	73
2.4.1.1. 100 mv polarizasyon kayma kriteri.....	75
2.4.1.2. (-) 850 mv kriteri .....	75
2.4.1.3. 300 mv değerine potansiyel kayması .....	76
2.4.1.4. Tafel bölgesi başlama noktası .....	77
2.4.2. Galvanik anotlu katodik koruma sistemleri .....	79
2.4.2.1. Galvanik anot çeşitleri .....	81

2.4.2.2. Galvanik anotların yataklarının hazırlanması ve uygulaması ....	91
2.4.2.3. Galvanik anot çeşidi belirleme kıstasları .....	92
2.4.2.4. Galvanik anotların montajı.....	94
2.4.2.5. Galvanik anotların net kullanım ömürleri .....	98
2.4.2.6. Galvanik anot yataklarının direnç hesaplaması.....	99
2.4.2.7. Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin sağladığı avantajlar .....	100
2.4.2.8. Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerindeki dezavantajlar	100
2.4.3. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi .....	101
2.4.3.1. Yardımcı anotlar.....	102
2.4.3.2. Yardımcı anotların kullanım ömürleri .....	109
2.4.3.3. Yardımcı anotların anot yatağı içine montajı.....	110
2.4.3.4. Yardımcı anotların yatak direnci.....	117
2.4.3.5. Transformatör/redresör ünitesi akım çevirici.....	118
2.4.3.6. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin sağladığı avantajlar .....	124
2.4.3.7. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde oluşan dezavantajlar .....	124
3. YÖNTEM.....	126
3.1. Katodik Koruma Sistemlerinde Hesap Yöntemleri .....	126
3.1.1. Zemin etüt çalışmaları.....	126
3.1.1.1. Zemin rezistivitesinin (özgül direncinin) belirlenmesi .....	126
3.1.2. Zemin ph değerinin belirlenmesi .....	130
3.1.3. Zemin redoks potansiyelinin belirlenmesi .....	132
3.1.4. Boru hattının karakteristik özelliklerinin belirlenmesi.....	133
3.1.5. Katodik korumada akım ihtiyacının belirlenmesi .....	135
3.1.5.1. Katodik koruma sistemlerinin ihtiyaç duyduğu akımın tahmini yöntem ile belirlenmesi .....	135
3.1.5.2. Boru hattında ihtiyaç duyulan akımın v.s. kalman eğrisi yardımıyla tayini .....	138
3.1.5.3. Akım ihtiyacının hesaplanması .....	140
3.1.6. Katodik koruma sistemi tercihi .....	144
3.1.7. Anot yatağı dizaynı .....	145
3.1.8. Dış akım kaynaklı katodik koruma için t/r ünitesi akım ve gerilim değer tespiti.....	146
3.2. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Testleri .....	147

3.2.1. Kullanılan boru hattı karakteristik özellikleri .....	147
3.2.2. Deneysel olarak çalışılan Boru hattının zemin özgül direnç hesap yöntemi.....	148
3.2.3. Toprak ph değeri ölçüm yöntemi .....	149
3.2.4. Boru hattı redoks potansiyel ölçüm yöntemi .....	150
3.2.5. Boru hattı kaplama direnci ve akım ihtiyacı hesap yöntemi .....	151
3.2.6. Ölçü kutuları ve özellikleri.....	152
3.2.7. Boru hattı anot yatağı .....	153
3.2.7.1. Titanyum anot .....	154
3.2.7.2. Kok tozu özellikleri.....	156
3.3. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Galvanik Anotlu Katodik Koruma Proje Testleri.....	157
3.3.1. Deneysel çalışmadaki karakteristik özellikler.....	157
3.3.2. Örnek proje boru hattı kaplaması ve akım ihtiyacı hesap yöntemi .....	158
3.3.3. Örnek projede kullanılacak anotlar ve kabloları .....	158
3.3.4. Kullanılan malzeme ve yöntem.....	160
4. BULGULAR .....	161
4.1. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Dış Akım Kayaklı Katodik Koruma Test Sonuçları .....	161
4.1.1. Rezistivite değeri.....	161
4.1.2. Ph değerleri .....	162
4.1.3. Redoks ölçüm sonuçları .....	163
4.1.4. Boru hattı kaplama direnci ve t/r ünitesi akım ihtiyacı .....	164
4.1.5. Anot yatağı hesabı ve t/r ünitesi kapasitesi .....	166
4.1.6. Geçici katodik koruma uygulaması.....	171
4.1.7. Örnek proje kapsamında elde edilen bulguların özeti.....	173
4.2. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Galvanik Anotlu Katodik Koruma Test Sonuçları .....	174
4.2.1. Toprak rezistivite ölçüm sonuçları .....	174
4.2.2. Ph ölçüm sonuçları .....	175
4.2.3. Redoks ölçüm sonuçları .....	175
4.2.4. Anot âdeti ve ömür hesaplamaları.....	175
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	178
6. KAYNAKLAR .....	180
ÖZGEÇMİŞ .....	182

## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b> Farklı korozyon hızlarının dönüşüm faktörleri .....	6
<b>Tablo 2.2</b> Korozyon hızı ve maddenin korozyon dayanımı .....	6
<b>Tablo 2.3</b> Farklı tip korozifliğe sahip ortamlarda kullanılacak bazı malzemeler ....	61
<b>Tablo 2.4</b> Katodik ve anodik korumanın kıyaslanması.....	70
<b>Tablo 2.5</b> Galvanik anotların özgül dirence göre kullanım sınırları .....	81
<b>Tablo 2.6</b> Magnezyum anotların sahip oldukları elektrokimyasal özellikler.....	83
<b>Tablo 2.7</b> Türk Standardındaki magnezyum anot ölçüleri.....	84
<b>Tablo 2.8</b> NACE Standardında ki AZ-63 tipi magnezyum anodunun ölçüleri.....	85
<b>Tablo 2.9</b> NACE standartlarına göre yüksek potansiyele sahip Mg anotların ölçüleri..	85
<b>Tablo 2.10</b> Çinko anotların elektrokimyasal özelliklerini gösteren tablo .....	87
<b>Tablo 2.11</b> Zemin içerisinde kullanıma uygun olan çinko anotların ölçüleri .....	87
<b>Tablo 2.12</b> Deniz içinde kullanıma uygun olan çinko anotların boyutlandırılması.....	88
<b>Tablo 2.13</b> Alüminyum galvanik anotların sahip oldukları elektrokimyasal özellikler.	89
<b>Tablo 2.14</b> Türk standartlarına göre deniz suyu içinde kalan boru hatları için alüminyum anotların boyutları.....	90
<b>Tablo 2.15</b> Toprağın sahip olduğu elektrik özgül direncine göre kullanılabilir anot kütleleri .....	91
<b>Tablo 2.16</b> Galvanik anot yataklarının doldurulmasında kullanılan dolgu maddeleri...	92
<b>Tablo 2.17</b> Kromlu ve kromsuz demir-silikon anotların kimyasal içeriği .....	104
<b>Tablo 2.18</b> TS-5141'e göre demir-silikon anot ölçüleri.....	105
<b>Tablo 2.19</b> Platin kaplı titanyum anot ölçüleri.....	106
<b>Tablo 2.20</b> Metal oksit kaplı titanyum anotların akım ve ortam özgül direnç değerleri.....	107
<b>Tablo 2.21</b> Metal oksit kaplı titanyum anotların boyutları ve çıkış akımı değerleri ...	108
<b>Tablo 2.22</b> Yardımcı anotların başlıca özellikleri.....	109
<b>Tablo 2.23</b> Yardımcı anotların kullanım faktörleri ve en yüksek doğru akım çıkış potansiyelleri.....	109
<b>Tablo 2.24</b> Yardımcı anot yatağında dolgu maddesi olarak kullanılan kok tozu özellikleri .....	111
<b>Tablo 3.1</b> Zeminin sahip olduğu elektriksel özgül dirence göre koroziflik dereceleri.	126
<b>Tablo 3.2</b> pH değerine göre toprak zeminin asitlik baziklik durumu .....	131
<b>Tablo 3.3</b> Redoks potansiyeline göre toprak zemin koroziflik durumu.....	132
<b>Tablo 3.4</b> PE kaplı çelik boruların en düşük kaplama kalınlıkları .....	133
<b>Tablo 3.5</b> Kaplama malzemesine göre kaplamaların direnç değerleri.....	134

<b>Tablo 3.6</b>	Kaplamaların zemin özgül dirençlerine göre gösterdikleri dirençler .....	134
<b>Tablo 3.7</b>	Kaplamasız çelik boruların zemin özgül direnci baz alınarak ortalama akım ihtiyacı .....	136
<b>Tablo 3.8</b>	Çeşitli çevrelere ihtiyaç duyulan göre ortalama akım .....	136
<b>Tablo 3.9</b>	Kaplama direncine göre ihtiyaç duyulan ortalama akım .....	137
<b>Tablo 3.10</b>	Kaplama türüne göre ihtiyaç duyulan akım.....	137
<b>Tablo 3.11</b>	Kaplamanın türüne göre kaplama tür katsayıları.....	139
<b>Tablo 3.12</b>	V.S. kalman eğrisi baz alınarak hazırlanmış rezistivite ve akım değerleri	139
<b>Tablo 3.13</b>	Karma metal oksit titanyum anot akım kapasiteleri .....	155
<b>Tablo 3.14</b>	Kaplamanın cinsine bağlı olarak boru hasar yüzdeleri(k) .....	158
<b>Tablo 3.15</b>	Toprak rezistivitesine göre çıplak demir akım yoğunluğu .....	158
<b>Tablo 3.16</b>	AZ 63 tip anotların kimyasal özellikleri .....	158
<b>Tablo 3.17</b>	H.pot tip anotların kimyasal özellikleri .....	159
<b>Tablo 3.18</b>	Magnezyum anotların dolguları (ortalama toprak rezistivitesine göre)....	159
<b>Tablo 4.1</b>	Rezistivite listesi ve ortalama değer .....	161
<b>Tablo 4.2</b>	Boru hattı güzergâhının ortalama rezistivite değerlerine göre koroziflik durumu .....	162
<b>Tablo 4.3</b>	Güzerghah üzerinde ki pH ölçümleri ve ortalama değer .....	162
<b>Tablo 4.4</b>	Güzerghah üzerinden redoks ölçümleri ve ortalama değer .....	163
<b>Tablo 4.5</b>	Rezistivite ortalamasına göre kaplama direnç değeri .....	164
<b>Tablo 4.6</b>	Anot yatağı noktası ortalama direnç değeri .....	168
<b>Tablo 4.7</b>	Zemin rezistivite değerleri .....	174
<b>Tablo 4.8</b>	Ortalama rezistivite değerine göre koroziflik durumu.....	174
<b>Tablo 4.9</b>	pH ölçümleri ve ortalama değer.....	175
<b>Tablo 4.10</b>	Redoks ölçümleri ve ortalama değer .....	175

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Korozyon etkisiyle oluşan maliyetin ABD GSMH içerisindeki oranı .....	3
Şekil 2.2	Korozyon akımı .....	5
Şekil 2.3	Korozyon hücresi .....	5
Şekil 2.4	Anot ile katot kısımların kesin olarak ayrılıp çukur korozyonu oluşturması. ...	7
Şekil 2.5	Çeşitli çukur korozyon oluşumları .....	8
Şekil 2.6	Filiform korozyon.....	9
Şekil 2.7	Filiform korozyon ve filiform ipliği görüntüleri .....	10
Şekil 2.8	Çinko azalması (a) mikroskopik görüntü (b) korozyon kesit görüntüsü .....	11
Şekil 2.9	Gri dökme demirde grafitleşme görüntüsü.....	12
Şekil 2.10	Galvanik korozyon akım şeması .....	14
Şekil 2.11	Kuru pil ile galvanik korozyon arasındaki ilişkilendirme .....	14
Şekil 2.12	Balıkçı gemilerinde bulunan tek döngülü sintine pompalarının giriş kısmında oluşan galvanik tipi bir korozyon örneği. Çelik atomunun çekirdeğinin etrafında bulunan magnezyum kabuk arasında korozyon gerçekleşir .....	15
Şekil 2.13	Platin ile birleşik çinko parçasının korozyonu .....	16
Şekil 2.14	Galvanik tipi korozyonun hızının katot ve anot yüzey oranına göre değişimi, ve çelik-bakır çiftte alanın etkisi a) Küçük yüzey alanlı katot-büyük yüzey alanlı anot ve elektrolit iletkenliği fazla, b) Küçük yüzey alanlı katot-büyük yüzey alanlı anot fakat elektrolit iletkenliği az, c) Yalnızca Büyük yüzey alanlı katot-küçük yüzey alanlı anot	17
Şekil 2.15	Oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesi.	19
Şekil 2.16	Erozyon tipi korozyon ve erozyon tipi korozyonun başlama durumu .....	20
Şekil 2.17	Metal boru içinde gerçekleşen erozyon korozyonu.....	21
Şekil 2.18	Buhar iletim hattında bulunan dirseğin darbelere karşı dayanıksızlığı .....	22
Şekil 2.19	Çeşitli malzemelerden üretilmiş boru iç yüzeyinden başlayan erozyon korozyonunun ilerleyerek borunun dış yüzeyini delmesine kadar geçen süreç.....	23
Şekil 2.20	Pervanede ve boru yüzeyinde meydana gelen kavite tip korozyon .....	28
Şekil 2.21	Kavite tip korozyonun meydana geliş prosesi ve kavite tip korozyon sonucu meydana gelen çukurcuklar. ....	28
Şekil 2.22	Fretaj korozyonu.....	30
Şekil 2.23	Aralık korozyonu.....	33
Şekil 2.24	Somun-vida bağlantısında gerçekleşen aralık korozyon olayı .....	33
Şekil 2.25	Aralık korozyonu oluşum mekanizması.....	34
Şekil 2.26	Paslanmaz çelikte meydana gelen aralık korozyonu .....	36
Şekil 2.27	Her noktada aynı miktarda gerçekleşen homojen korozyon olayı .....	37
Şekil 2.28	Homojen dağılımlı korozyona uğramış boru parçası .....	38

<b>Şekil 2.29</b> Homojen korozyon sonucu kopan doğalgaz boruları örnekleri .....	38
<b>Şekil 2.30</b> Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökeltisi (x 1200) .....	40
<b>Şekil 2.31</b> Taneler arasına krom karbürlerin yerleşmesi .....	41
<b>Şekil 2.32</b> Krom karbür çökmesi sonucu hassas bölgede oluşan korozyon .....	41
<b>Şekil 2.33</b> Bir demir çubuğun somun cıvata arasında korozif ortamda gerdirilerek ortaya çıkan gerilim korozyonu. Gerilimin en yoğun olduğu noktada çatlak ve kırılmalar oluşur .....	43
<b>Şekil 2.34</b> Çekme gerilmelerine maruz kalan çelik maddenin korozif ortamın etkisi nedeniyle gerçekleşen gerilmeli tip korozyonun mikroskobik görünümü.....	44
<b>Şekil 2.35</b> Pirinçte gerçekleşen taneler arası gerilme korozyon çatlaklığı. ....	44
<b>Şekil 2.36</b> 316L tipi paslanmaz çelikten üretilmiş ısı değiştiricisinin de klorun nedeniyle oluşan gerilmeli tip korozyonun çatlaklığı.....	45
<b>Şekil 2.37</b> Dişlilerde oluşan yorulmalı tip korozyonun temas sonucu çatlama örneği... ..	52
<b>Şekil 2.38</b> Buharlı bir sistemde gerçekleşen yorulmalı korozyon. ....	52
<b>Şekil 2.39</b> Mikrobiyolojik korozyon olayının gelişim mekanizması .....	60
<b>Şekil 2.40</b> Üç katlı pe kaplama .....	66
<b>Şekil 2.41</b> Anodik ve katodik koruma sistemlerinin akım ihtiyaç değerleri .....	69
<b>Şekil 2.42</b> Elektrokimyasal hücre .....	74
<b>Şekil 2.43</b> Metalin korozyona uğraması ve bu durumun önüne geçmek için katodik koruma mekanizması .....	74
<b>Şekil 2.44</b> Demir-su sistemi için oluşan pourbaix diyagramı.....	76
<b>Şekil 2.45</b> Tafel eğrisi korozyon başlangıç noktası .....	77
<b>Şekil 2.46</b> Katodik korumaya ait potansiyel kriterleri.....	78
<b>Şekil 2.47</b> Galvanik anotlu katodik koruma sistem mekanizması.....	79
<b>Şekil 2.48</b> Magnezyum anotların çeşitleri (a) torba tipi Mg anot (b) D tipi H.pot Mg anot.....	82
<b>Şekil 2.49</b> Toprakaltı sistem için magnezyum anotlu galvanik katodik koruma mekanizması .....	83
<b>Şekil 2.50</b> D profilli magnezyum anot gösterimi .....	84
<b>Şekil 2.51</b> Magnezyum anotlardaki akım verimliliğinin akım yoğunluğuna göre değişme grafiği.....	86
<b>Şekil 2.52</b> Zemin altında kalan çinko anot profili .....	87
<b>Şekil 2.53</b> Deniz içinde kullanıma uygun çinko anotların profili.....	88
<b>Şekil 2.54</b> Alüminyum anot profili.....	89
<b>Şekil 2.55</b> Paket halinde bulunan bir galvanik anodun şeması.....	94
<b>Şekil 2.56</b> Katodik koruma sistemlerinde galvanik anotların yerleşim durumu .....	95

Şekil 2.57 Paralel bağlantı şekli ile sistemin ihtiyaç duyduğu sayıda galvanik anotların birbirleri ile bağlantı şeması .....	96
Şekil 2.58 Toprak üstünde bulunan ölçüm istasyonu .....	97
Şekil 2.59 Ölçüm kutusu ve kutunun iç kısmı .....	98
Şekil 2.60 Dış akım kaynaklı katodik koruma sistem mekanizması .....	101
Şekil 2.61 100 lb demir silikon anodu şeması .....	105
Şekil 2.62 LİDA anot dizilişi.....	107
Şekil 2.63 Sığ olarak hazırlanmış anot yatağına yardımcı anotların yatay pozisyonda montajı .....	113
Şekil 2.64 Yardımcı anotların sığ anot yataklarına dikey pozisyonda gömülmesi .....	114
Şekil 2.65 Derin kuyu anot yatak şeması .....	115
Şekil 2.66 Yardımcı anotların yatak direnci üst sınırının belirlenmesinde kullanılan grafik.....	118
Şekil 2.67 Redresör panosu akım şeması .....	119
Şekil 2.68 T/R ünitesi .....	120
Şekil 2.69 Yarım dalga ve tam dalga redresör ünite tipleri .....	121
Şekil 2.70 Cu/CuSO <sub>4</sub> torba tipi ve silindir tip referans elektrotları .....	122
Şekil 2.71 Cu/CuSO <sub>4</sub> referans elektrotu .....	123
Şekil 2.72 Diyot Al soğutucu gövde.....	124
Şekil 3.1 Zemin özgül direncin nem oranına bağlı olarak gösterdiği değişim .....	127
Şekil 3.2 Wenner dört elektrot sistemi .....	129
Şekil 3.3 Toprak kutusu.....	130
Şekil 3.4 Pourbaix diyagramı .....	131
Şekil 3.5 V.S. kalman eğrisi .....	138
Şekil 3.6 İzole flanş ile sonlandırılmış boru hattının akım-gerilim grafiği .....	141
Şekil 3.7 İzole flanş ile sonlandırılmış ve sonlandırılmamış olan boru hattının akım ve gerilim değişim logaritmik eğrisi.....	143
Şekil 3.8 Katodik koruma türü tercih grafiği.....	145
Şekil 3.9 Uygun kablo tercihi için verilen grafik .....	147
Şekil 3.10 Dış akım kaynaklı katodik koruma uygulaması yapılması planlanan boru hattı .....	148
Şekil 3.11 Toprak meğeri .....	148
Şekil 3.12 pH metre .....	149
Şekil 3.13 Pourbaix diyagramı .....	150
Şekil 3.14 Dijital redoks ölçüm cihazı.....	150



<b>Şekil 3.15</b> Örnek proje kapsamında kullanılması planlanan ölçü kutusu ve kutunun iç kısmı.....	152
<b>Şekil 3.16</b> Anot yatakları (a) derin kuyu anot yatağı (b) sığ anot yatağı .....	154
<b>Şekil 3.17</b> Tüp titanyum anot .....	155
<b>Şekil 3.18</b> Örnek proje kapsamında kullanılacak kok tozu .....	156
<b>Şekil 3.19</b> Örnek proje kapsamında kullanılacak 6” borular.....	157
<b>Şekil 3.20</b> H.pot Mg anot ve kabloları.....	159
<b>Şekil 4.1</b> T/R ünitesi koruma mesafesi.....	165



## SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler	Açıklamaları
A	Boru kesit alanı (m <sup>2</sup> )
D	Boru çapı (m)
I	Akım ihtiyacı (A)
L	Korunacak boru uzunluğu (m)
L <sub>a</sub>	Anot boyu (cm)
ρ	Zemin elektrik özgül direnci (Ohm.cm)
ρ <sub>ort</sub>	Ortalama zemin özgül direnci (Ohm.cm)
E <sub>red</sub>	Zemin redoks potansiyel değeri (mV)
k	Kaplama kalınlığı (mm)
R <sub>K</sub>	Kaplamanın direnci (Ohm.m <sup>2</sup> )
a	Sönüm sabiti (m <sup>-1</sup> )
V	Potansiyel (mV)
t	Boru et kalınlığı (m)
N	Anot adeti
°C	Santigrat olarak sıcaklık ölçü birimi
e	Elektron
log	Logaritma
π	Pi Sayısı
Ω	Direnç ölçü birimi (Ohm)
μ	Mikro (milyonda bir birim)
E <sub>0</sub>	Akım drenaj noktası boru zemin potansiyeli (V)

Kısaltmalar	Açıklamaları
A	Amper
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif akım
BOTAŞ	Boru Hatları İle Petrol Taşıma Anonim Şirketi
DC	Doğru akım
DSİ	Devlet Su İşleri
GSMH	Gayri safi milli hasıla

İGDAŞ	İstanbul Gaz Dağıtım Anonim Şirketi
LİDA	Lineer dağılımlı anot
NACE	Korozyon Mühendisleri Ulusal Birliği
PE	Polietilen
pH	Hidrojenin gücü
T/R	Transformatör/Redresör
TS	Türk standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
V	Volt



## 1. GİRİŞ

Bu tezin amacı toprak altı veya su altından geçen boru hatlarının bu zeminlerde oluşan korozif etkiler nedeniyle korozyona uğraması sonucunda meydana gelen olumsuzlukların önüne geçilebilmesi için alınacak önlemlerin araştırılmasıdır. Özellikle son yıllarda korozyonla mücadele konusunda en etkili çözüm olan katodik koruma yöntemlerinin uygulama biçimleri, bu koruma yöntemlerinin yeterliliği ve en uygun katodik koruma yönteminin seçilmesidir. Gerekli teçhizatın sağlanması için ihtiyaç duyulan bilgileri edinmek için sayısal ölçüm verileri ile gerekli şartname ve uygulama esasları dikkate alınarak en ekonomik ve sağlıklı katodik koruma yönteminin seçilmesidir. Korozyon günümüzde dünyada en fazla metal ürünlerde meydana gelmekte olup ciddi maddi kayıplara ve telafisi zor bozunmalara sebep olmaktadır. Çeşitli korozyondan korunma yöntemleri günümüzde uygulanmaktadır. Fakat bunların arasında maliyeti en az, koruması en etkili ve herhangi bir arıza durumunda onarımı en kolay olan yöntem katodik koruma yöntemi olmaktadır. Özellikle yer altı borulamasında bu sistem kullanılmakta olup çeşitleri, avantajları ve dezavantajları ayrıntılı bir biçimde tezimde incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR

### 2.1. Korozyon

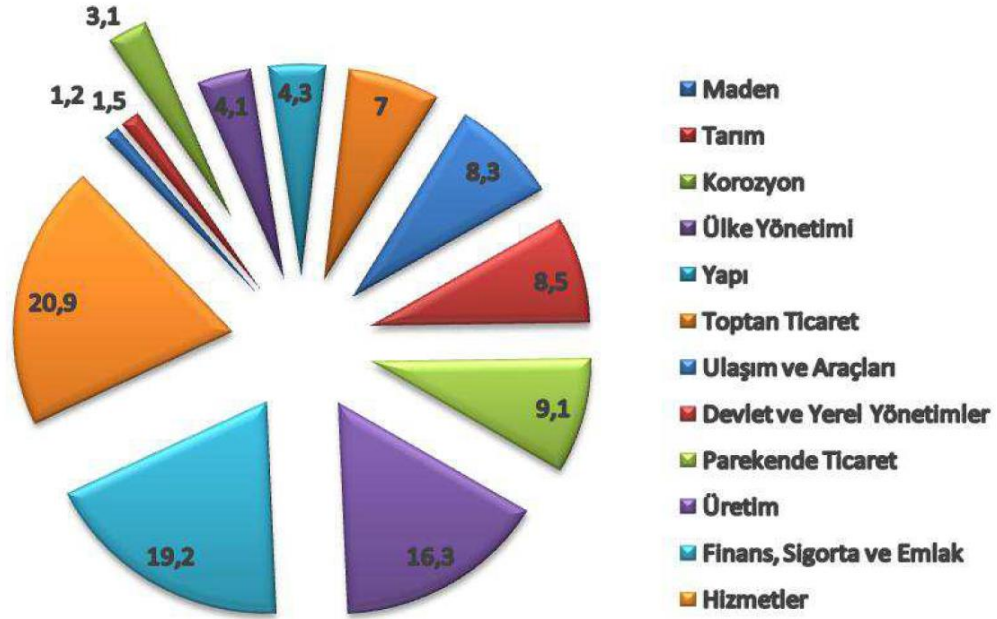
Korozyon günümüzün ilerleyen sanayi ve teknolojik faaliyetler ve enerji sektörü açısından istenmeyen, oluşumu bir anda belli olmayıp zaman içerisinde etkisini gösteren ve geri dönüşü olmayacak tahribatlara yol açacak bir durumdur. Korozyonun etkisini gösterene kadar geçen sürede içerisinde malzemeyi yüksek oranda tahribata uğratarak tüketir. Korozyon olayı sık olarak metalik yapılarda görülmesine karşın metal özellik göstermeyen malzemelerin yüzeylerinde ya da içyapısında tahribatlar ile karşılaşmaktadır.

Genel tanımı metal bir malzemenin ya da alaşımın atmosfer etkenlerine ya da temas ettiği yüzeylerdeki iyonların metal malzemeye doğru akışı ile oluşur. Metal malzemenin atomik yapısına yaptığı fiziksel ya da kimyasal tahribat aşınma veya bozunma durumu korozyon olarak tanımlanır. Korozyonun sebebi kararsız halde bulunan metalin serbest elektrolarını ortama vererek pozitif iyonlar meydana getirmesidir. Korozyona neden olan bu materyallere ise korozif maddeler denir. Fakat korozyona uğrayan malzeme yalnızca metal olmayabilir plastik malzemeler tahta veya hücre doku ya da organlar dahi korozyona uğrayabilir. Korozif maddeler iyon akışına göre değişkenlik gösterebilir.

Korozyon ülke ekonomisini etkileyen önemli bir etken olup her yıl üretilen çelik miktarının dörtte biri korozyon nedeni ile kayıp verilmektedir. Şehirlerin kirli ve nemli havası, asitli yağmur suları ve deniz suyu toprak altındaki iyon hareketleri korozyonun başlıca sebeplerindendir (Yalçın ve Koç, 1991).

DIN 50900 standardına göre ise korozyonun tanımı şu şekildedir; metalik yapının ölçülebilir bir düzeyde değişim göstermesine yol açan metalik yapı ile ortam arasında gerçekleşen reaksiyonlardır. Yine bu standarda göre korozyonun zararı metal yapıya bir parçada ya da tüm sistem üzerinde verdiği zarar olarak adlandırılır (Görenler, 2007).

Korozyonun neden olduğu kayıplar; ekonomik kayıplar, tesisin servis dışı kalması, ürün kaybı, ürün kirlenmesi, verim kaybı şeklindedir.



Şekil 2.1 Korozyon etkisiyle oluşan maliyetin ABD GSMH içerisindeki oranı

Malzeme üzerine etki eden korozyonun etkisiyle gerçekleşen enerji ve servet kaybının yıllık oranı ülkeler bazında, GSMH'nın yaklaşık %5 düzeyindedir. ABD'de ise bu oran yaklaşık 444 milyar \$ kayıp ile birlikte GSMH'nın %3,1'i kadardır. ABD Donanmasında, donanma korozyon önleme ve kontrol bölümü tarafından düzenlenen 2010 yılındaki rapora göre korozyonun donanma içerisindeki toplam maliyeti 7,36 milyar \$ olarak ortaya konulmuştur (Elçiçek, Karaoğlanlı ve Demirel, 2011).

Kimyasal korozyon (kuru korozyon); Gazlı ortamlarda bulunan metal veya metal alaşımlarının oksitlenmesi sonucu kimyasal korozyon oluşur. Yalnız dış ortamı çevreleyen nemli havanın sebep verdiği aşınmalar kimyasal korozyonun dışında kalır.

Elektrokimyasal korozyon (Islak korozyon); Metal veya metal alaşımlarının su ile teması sonucu oluşan korozyon türüdür.

### 2.1.1. Korozyon tepkimeleri

Oksijenden arındırılmış asidik ortamlarda meydana gelen korozyon;

Çinkoyu hidroklorik asit içerisinde daldırdığımızda meydana gelen olay:

Anot reaksiyonu;



Katot reaksiyonu;



Toplam;



Havalandırılmış nötr ve bazik ortamların meydana getirdiği korozyon;

Deniz suyu içerisine daldırılmış çelik madde verilebilecek güzel örneklerdendir:

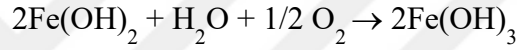
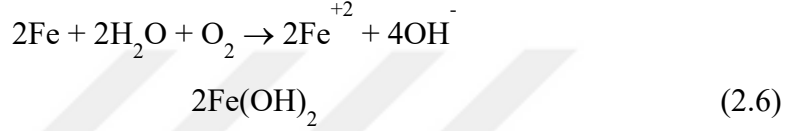
Anot reaksiyonu;



Katot reaksiyonu;



Toplam;



Havalandırılmış asidik ortamların korozyonu;

Bu tip ortamlar içeriğinde hidrojen iyonları ile birlikte oksijen atomlarını da bulundurlar.

Hidrojen atomlarının varlığı ortamda var olan oksijenle reaksiyona girmesi ile indirgenmesine neden olur.



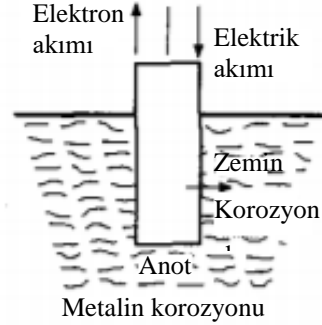
Korozyon elektrokimyasal reaksiyon eğiliminden dolayı daha çok metaller de meydana gelir.

Metaller doğada kararlı halde bulunurlar ve buldukları ilk hale dönme eğilimindedirler. Doğada bulunan mineraller çeşitli metalurjik yöntemlerle enerji harcanarak metal haline gelirken kararlı yapıları kararsız hale dönüşebilir bu sebepten dolayı metaller eski kararlı yapılarına dönme eğilimindedirler.

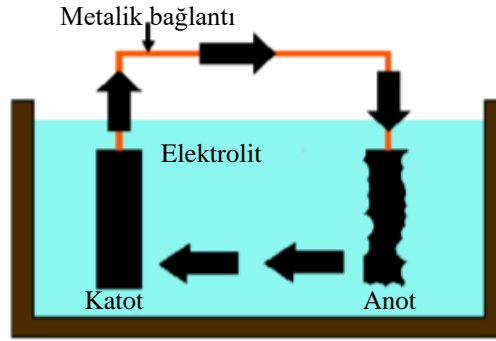
### 2.1.2. Korozyon hücresi

İletken özelliğe sahip iyonik bir ortama batırılan metalik malzeme, elektrolit olarak adlandırılan ortama pozitif iyonlar vererek metal yapısında kalan fazla elektronlar dolayısıyla negatif yüklü hal alır. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te korozif ortamda bulunan metalik boru parçasının pil özelliği görerek çevreye iyonlar çıkardığı ve bu boru parçasında geriye kalan elektronların negatif bir yük oluşturduğu fark

edilmektedir. Bu çelik boru parçası iyonlar halinde parçalanarak kütle kaybına uğramaktadır. 1 A.h değerindeki korozyon akımı, 1 yılda 10 kg çelik borunun iyonlaşmasını sağlamaktadır. Korozyon hücresi mekanizması anot, katot, elektrolit ve metalik bağlantı şeklinde gerçekleşir (Çizmecioğlu,1998).



Şekil 2.2 Korozyon akımı



Şekil 2.3 Korozyon hücresi

### 2.1.3. Korozyon hız birimleri

Malzemenin korozyona uğrama süreci bazen uzun yıllar alabilir bazen ise daha kısa zamanda gerçekleşebilir. Bunun oluşumu malzemeye ve korozif ortama bağlı olup korozyon oluşumu sırasında geçen bu süreye korozyon hızı denir. Korozyonun hız iki şekilde ifade edilebilir.

Birim zamanda, birim yüzeyde gerçekleşen maddenin kütesinin kaybı,

Birim zamanda malzemenin yüzeyinde kalınlığın düşmesi.

Korozyonun gerçekleşme hızı aşağıdaki birimlerle gösterilir.

Korozyon penetrasyonu: Bir yılda gerçekleşen malzemenin kalınlığındaki azalma, mm/yıl (MPY) şeklinde ifade edilir.

Ağırlık kaybı: Malzemenin 1 m<sup>2</sup>'sinde korozyon nedeniyle oluşan kütle kaybıdır. g/m<sup>2</sup>gün (GMD) şeklinde ifade edilir.



Korozyon akım yoğunluğu: 1 cm<sup>2</sup> deki malzemenin yüzeyindeki anodik akım yoğunluğu ,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  şeklinde ifade edilir.

Demir metalinden bahsedildiği zaman ise hız birimlerine karşılık gelen değerler  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 0,0116 \text{ mm}/\text{yıl} = 0,25 \text{ g}/\text{m}^2 \text{ gün}$  şeklindedir.

**Tablo 2.1** Farklı korozyon hızlarının dönüşüm faktörleri (Megep, 2013)

Verilen Korozyon Hız Birimi	Katsayı	Korozyon Hız Birimi
MDD (mg/dm <sup>2</sup> .gün)	10	GMD (g/m <sup>2</sup> .gün)
MDD (mg/dm <sup>2</sup> .gün)	0,03652/d	MPY (mm/yıl)
Korozyon akım yoğunluğu	$8,95 \cdot M_A/n$	GMD (g/m <sup>2</sup> .gün)
PYF (pound/ft <sup>2</sup> .yıl)	133,8	MDD (mg/dm <sup>2</sup> .gün)
İPY (inç/yıl)	694,4.d	MDD (mg/dm <sup>2</sup> .gün)
GMV (g/m <sup>2</sup> .yıl)	0,0274	MDD (mg/dm <sup>2</sup> .gün)
n = Söz konusu metalin değerliği d = Söz konusu metalin yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) MA = Söz konusu metalin atom kütlesi		

Homojen korozyonun hızı aşağıdaki formül ile elde edilir (Mutlu, 2010).

$$R = (k \times W) / (A \times t \times d) \quad (2.8)$$

Bu eşitlikteki ifadelerin anlamları şöyledir:

R: Korozyon hızı (mm/yıl),

k: Sabit sayı (korozyon hızı birimine bağlı),

W: Ağırlık kaybı (gr),

A: Yüzey alanı (cm<sup>2</sup>),

t: Zaman (yıl),

d: Yoğunluk (gr/cm<sup>3</sup>).

Maddelerin korozyona karşı direncinin kuvvetini yukarıdaki formül ile elde etmek gerekir.

**Tablo 2.2** Korozyon hızı ve maddenin korozyon dayanımı

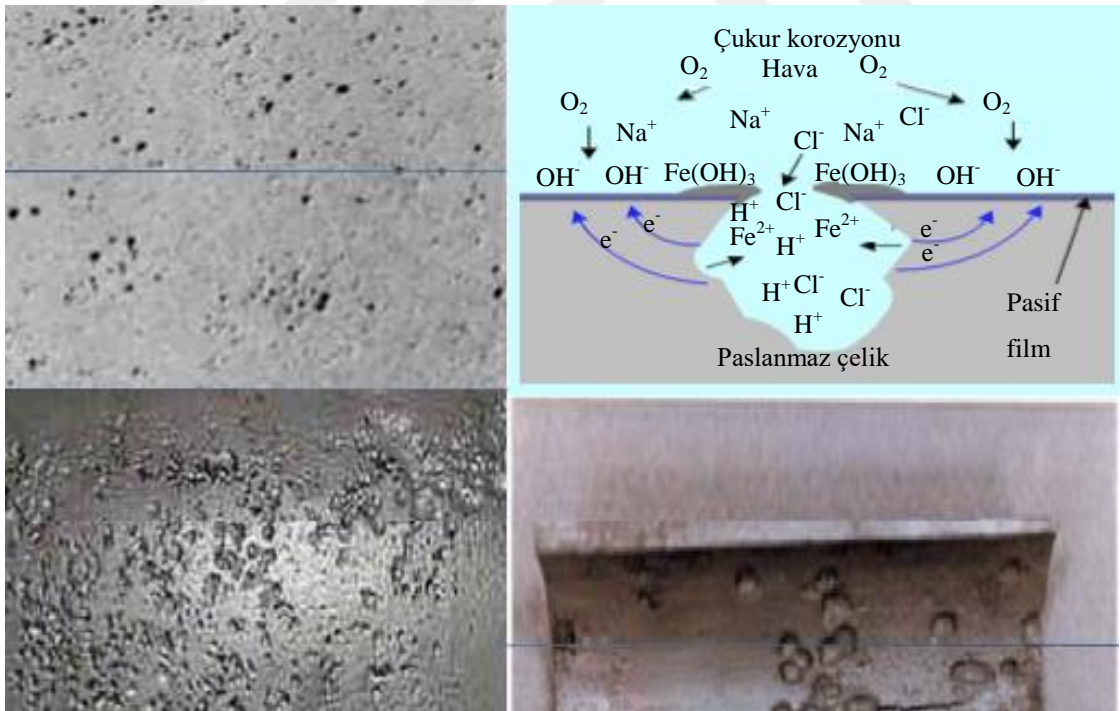
Korozyon Hızı (R) (mm/yıl)	Malzemenin Korozyona Karşı Dayanıklılığı
R < 0,15	Dayanıklı
0,15 < R < 1,5	Orta Derece Dayanıklı
1,5 < R	Dayanaksız

## 2.2. Korozyon Çeşitleri

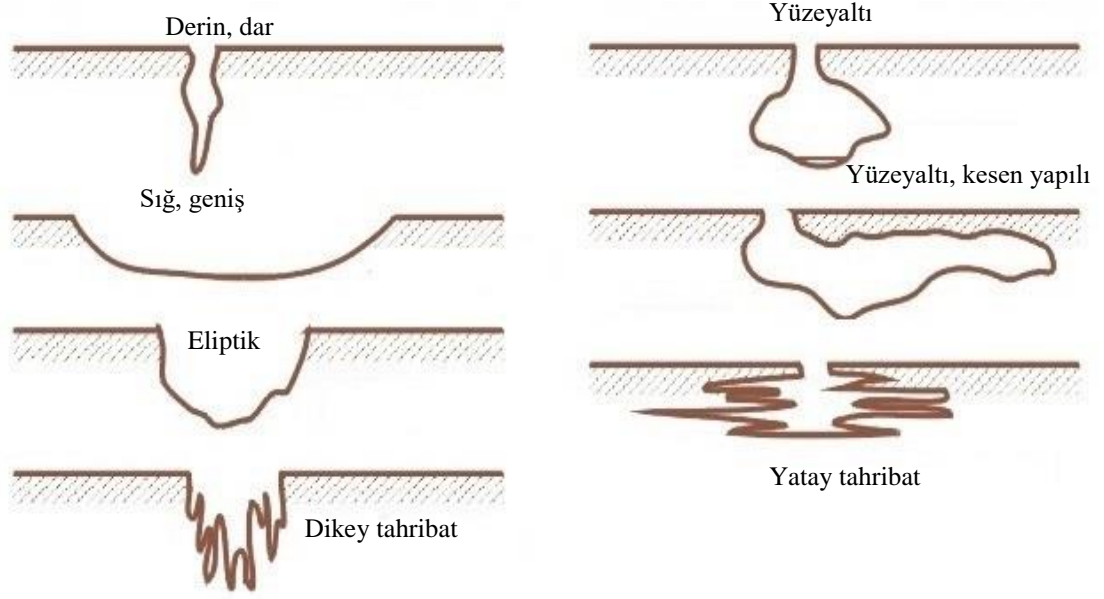
### 2.2.1. Çukur tipi korozyonu

Metal yüzeyinin herhangi bir noktasında meydana gelen çukur şeklinde oluşan korozyona çukur korozyonu denir. Çukur korozyonu genellikle pasifleşebilen alüminyum alaşımlarında ve paslanmaz çeliklerde görülür ve değişik şekillerde noktasal derin çukurlar halinde meydana gelir. Genellikle oluşan çukurlar o kadar küçüktür ki gözle görmek çok zordur. Meydana gelen çukurların derinliği çaplarına eşdeğerdir.

Bu korozyon tipinin gerçekleşebilmesi için ortamda bromür, klorür gibi halojen iyonların bulunması gereklidir. Bu korozyon türünde anot ve katot kısımları birbirinden kesin olarak ayrılır. Katot, çukurun etrafındaki geniş alan, Anot ise yüzeyde oluşan çukur içerisindeki dar bir bölgedir (Şekil 2.4). Korozyon nedeni ile oluşan çukur zamanla büyür ve malzemenin bu noktada kısa bir zaman içerisinde oyuklanmasına sebep olur. Çukur tipi korozyon bu sebeple en tehlikeli korozyon tipi olarak bilinir. Malzeme kaybı az olmasına karşın, malzeme kısa bir süre içerisinde delinir ve kullanılamayacak hale gelir.



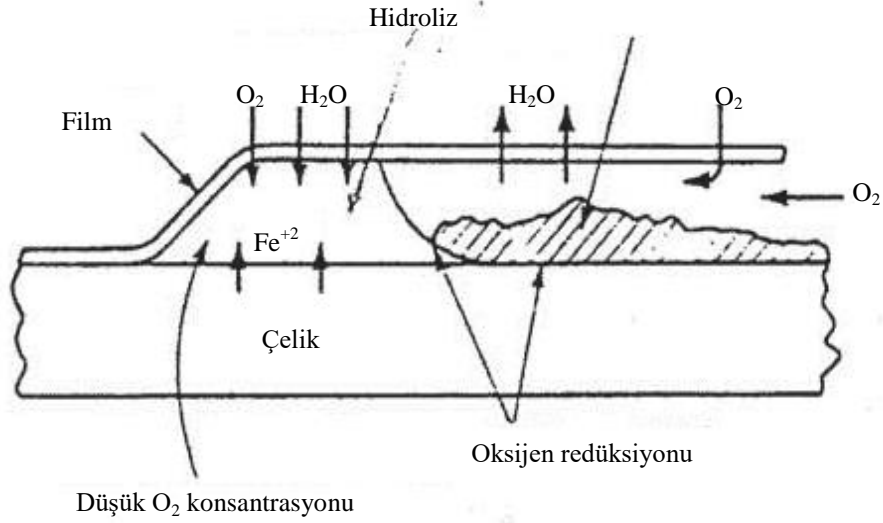
Şekil 2.4 Anot ile katot kısımların kesin olarak ayrılıp çukur korozyonu oluşturması



Şekil 2.5 Çeşitli çukur korozyon oluşumları

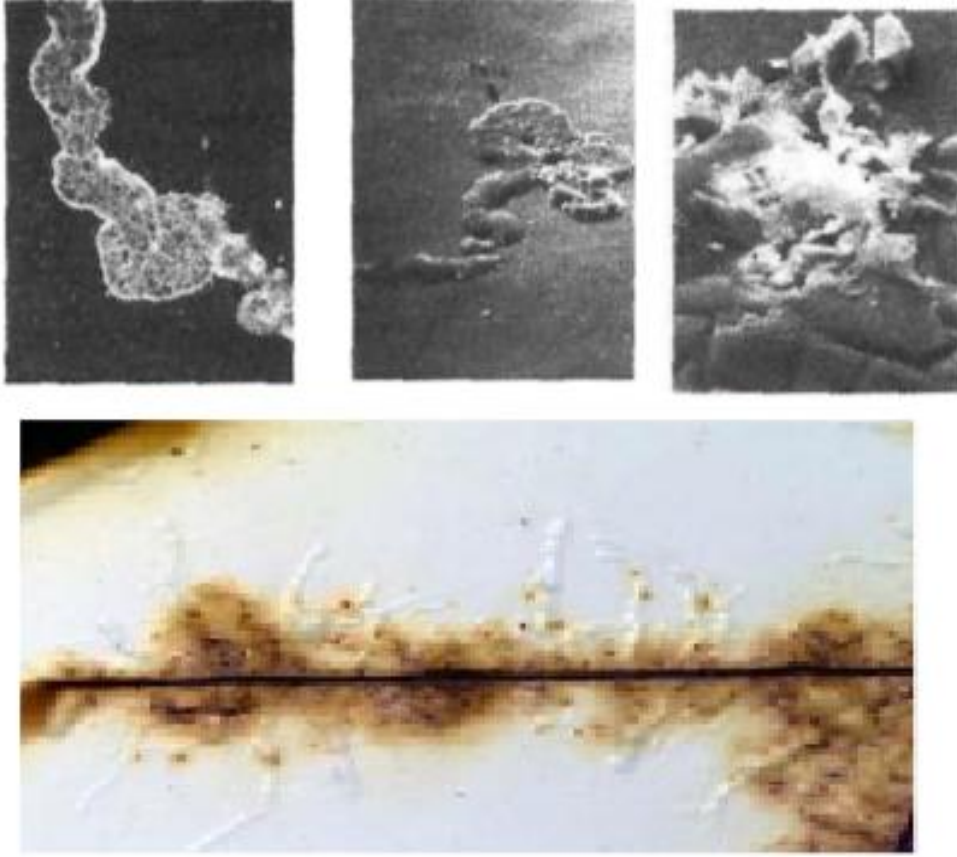
### 2.2.2. Filiform korozyon

Metal yüzeyin üzerinde bulunan kaplama tabakası veya boyanın altında meydana gelen korozyon yürüne filiform korozyon denir. Filiform korozyon %65-90 arasında bağıl nem değerinde olur. Bu değer altında metal korozyondan etkilenmez. Metalurjik yapıya bağlı değildir. Bu korozyona kabuk altı veya tabaka altı korozyonu olarak adlandırılmaktadır. En çok atmosferde atmosfer etkilerine maruz kalan emayelenmiş veya verniklenmiş konserve kutularında ya da buna benzer maddelerde meydana gelen korozyon tipidir. Bu korozyon türünde korozyonunun meydana geldiği yüzeylerde kırmızı kahverengi korozyon çizgileri belirgin şekilde görülür. Bir filiform çizgisi diğer filiform çizgisine paralel devam eder dik kesişme durumu görülmez, eğer kesişme durumu var ise yansıma yaparak yoluna devam eder. Filiform korozyon kabuk altında bir solucanın toprak altında yaptığı hareketlere benzer şekilde hareket etmektedir. Filiform korozyon diğer korozyon çeşitlerinde olduğu gibi malzeme yüzeyini tamamen aşındırmaz fakat malzeme yüzeyinde görüntü bozukluğuna neden olur.



Şekil 2.6 Filiform korozyon

Filiform korozyonun oluşması çatlak korozyonundaki oluşma mekanizmasının benzer şekildedir (Şekil 2.6). Bu korozyon kaplamanın en zayıf herhangi bir noktasında kaplama altına oksijen veya su girişi olduğu için meydana gelir. Oluşum sırasında, filiform ipliğin ucu osmotik basınç etkisiyle atmosferden gelen su kabarcıkları ile beslenir, oluşum sırasında malzemedan ayrılmaya başlayan  $Fe^{+2}$  iyonlarının konsantrasyonu yükselir. Osmotik etki suyun aktif olmayan kuyruktan uzaklaşmasına da sebep vermektedir. Bundan ötürü kuyruқта demir  $Fe(OH)_3$  olarak çöktüğünden sebep ile çözülmüş tuz konsantrasyonu düşüktür. Böylece, havadaki su, devamlı aktif uca yerleşirken, pasif olan kuyruktan uzaklaşır. Eğer madde üzerindeki koruma ya da boya tabakası ortamdandan su almazsa korozyon meydana gelmez. Korozyonun başladığı yerde oksijen konsantrasyonu en yüksek seviyededir ve korozyonun devam ettiği doğrultusunda üzerinde ileriye doğru gittikçe düşer. Korozyon sonucunda metal hidroksit ve hidrojen iyonları meydana gelir. Bunun sonucunda uç kısımda korozyonun devamı için uygun düşük oksijen konsantrasyonu ve düşük pH değerli ortam oluşturulmuş olur. Bundan dolayı korozyon sürekli uç noktadan ileriye doğru hareketine devam eder. Filiform korozyonun çeşitli görüntüleri Şekil 2.7' de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Filiform korozyon ve filiform ipliği görüntüleri

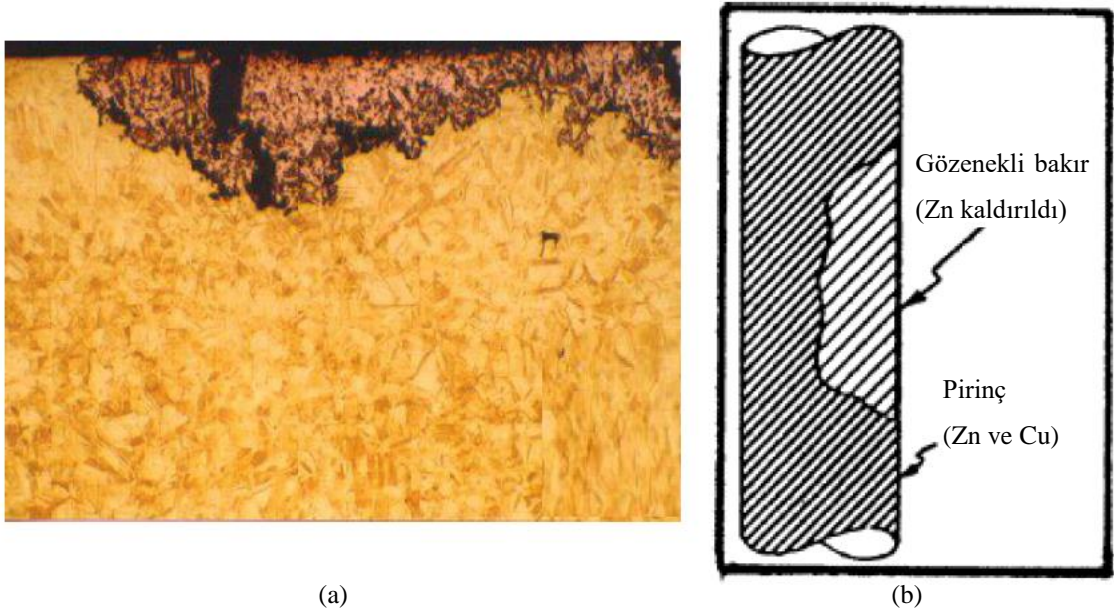
Filiform korozyonu önlemenin herhangi net bir yolu yoktur kaplanan malzemenin depo edildiği ortamların nem oranı düşük yerler olması tercih edilirse bir nebze olsa önüne geçilmiş olur.

### 2.2.3. Seçimli korozyon

Alaşımli maddelerden alaşımı oluşturan elementlerden herhangi birinin diğer elementten önce korozyona uğrayıp alaşımdan uzaklaşmasına seçimli korozyon denir.

#### 2.2.3.1. Çinko fakirleşmesi

%70 Cu ve % 30 Zn'den oluşan pirinçte bulunan Zn 'de kolayca korozyon meydana gelir. Korozyon dolayısı ile alaşım metali yüzeyinde bulunan Zn konsantrasyonu azalır ve sarı rengi kaybedip bakır kırmızısı rengine döner. Çıplak gözle çok rahat görülebilir. Bu örneğini vermiş olduğumuz seçimli korozyon olayına çinko azalması denir (Şekil 2.8). Çinko fakirleşmesinin iki türü vardır bunlardan biri bölgesel diğer üniform fakirleşmedir.



Şekil 2.8 Çinko azalması (a) mikroskopik görüntü (b) korozyon kesit görüntüsü

### 2.2.3.2. Grafitleşme

Diğer bir seçimli korozyon olayı grafitleşme (grafitizasyon) denir. Grafitleşme gri dökme demirde meydana gelen korozyondur. Gri dökme demir seçici korozyona uğraması için ortamın kesin korosif bir ortam olmasına gerek yoktur korozif olmayan ortamlarda da seçici korozyona uğrayabilir. Gri dökme demir içeriğinde %2 ile %4 arasında ki oranında karbon atomu bulunur. Demir çözünür ve grafit iskelet şeklini alır. Dökme demirin yüzeyinde grafit görünümü oluşur ve kolayca kesilebilir. Bu olaya grafit korozyonu da denir. Grafit demire göre katodiktir ve galvanik çift mevcut durumdadır. Demir çözülür ve geriye grafit ve pastan oluşan bir kütle kalır. Dökme demirin metalikliği ve mukavemeti yok olur. Boyutsal bir değişiklik meydana gelmez. Korozyon gözle görülemediğinden dolayı varlığını fark etmek pek mümkün değildir yavaş yavaş meydana gelen bu olay maddenin iç yapısında meydana gelir ve tehlikeli durumlar meydana getirebilir (Şekil 2.9). Küresel veya temperlenmiş dökme demirlerde ve beyaz dökme demir içinde karbon atomu serbest halde bulunmadığı için bu alışımlarda grafit bağları yoktur. Bu nedenle bu dökme demirlerde grafit korozyonu olayı meydana gelmez.



### 2.2.3.3. Çeşitli türlerde gerçekleşen seçimli korozyon olayları

Başka alaşımlarda da asitli ortamlarda seçimli korozyon görülebilir. HF yani hidroflorik asit ve diğer asidik özellik gösteren maddelerde, Al bronzlarında Alüminyum fakirleşmesi görülür. Co- W-Cr alaşımlarında kobalt (Co) fakirleşmesi ve (Cu-Si) silisyum bronzlarında Silisyum fakirleşmesi meydana gelebilir. Fakat tüm bunlar çinko fakirleşmesi kadar çok meydana gelen korozyon çeşitleri değildir. Seçimli korozyon bazen alaşım elementleri için faydalı sonuçlar ortaya çıkarabilir. Örnek verecek olursak paslanmaz çelik üzerindeki oksit tabakalarında gözlenen Si zenginleşmesi, pasivite ve oyuklu korozyona karşı direnci kuvvetlendirir.

Paslanmaz çelikler oksijen bulunan ortamlarda, çok yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığı durumlarda Cr fakirleşmesi görülür. Oksijene karşı direnci az olan bazı elementler daha fazla oksitlenir. Yukarıdaki bahsi geçen örnekte de paslanmaz çelik içerisinde bulunan krom elementinin oksijene olan yüksek afinitesinden dolayı paslanmaz çeliklerde krom kaybı gerçekleşir. %17 oranında krom içeren 430 tip paslanmaz çeliklerden üretimi gerçekleştirilen otomobil aksesuarlarının oyuklu korozyonu, bu maddenin tavlama esnasında krom elementlerinin azalması anlamına gelmektedir. Çelik yapının yüzeyine yakın olan bölümlerde %11 oranında krom elementi gözlenir. Oluşacak diğer bir durum ise, %75 oranında nikel , %15 oranında krom ve %9 oranında demir içeren Inconel, alaşımından Cr (krom) ve Fe (demir) fakirleşmesidir. Bu olayın gerçekleşebilmesi çelik yapının K-Na-florür-klorür tuz banyolarının 800°C sıcaklığında gerçekleşmesiyle görülür. Korozyon olayının gerçekleşmesi sonucunda alaşım süngerimsi bir hal alır.



Şekil 2.9 Gri dökme demirde grafitleşme görüntüsü

### 2.2.3.4. Seçimli korozyonun önlenmesi

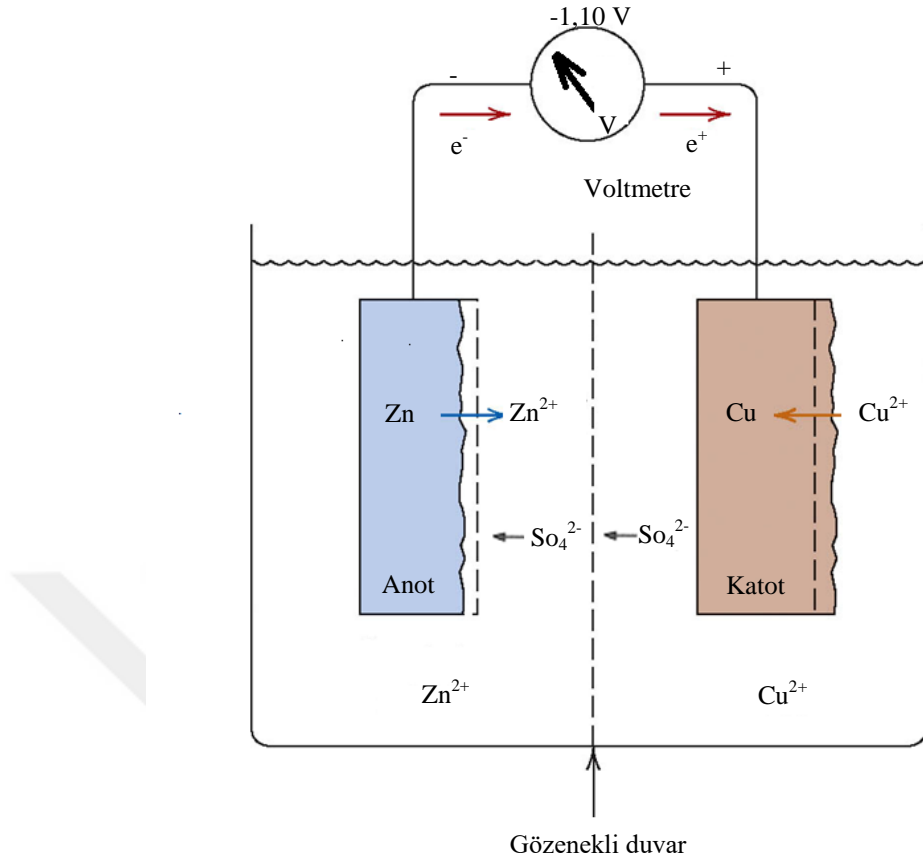
Çinko fakirleşmesi ortamın oksijen oranı düşürülerek indirilebilir ya da Katodik koruma yolu ile de azaltılabilir. Fakat çoğu durumda bu metotlar ekonomik

olmayabiliyor. Korozif ortamlara daha dayanıklı alaşımlar kullanılması. Dezinsifikasyon korozyonunu önlemenin en kesin çözümü alaşım içinde bulunan çinko yüzdesinin % 15'in altına düşürmek olacaktır. Pirincin içine % 1 oranında kalay eklersek korozyona karşı direncini arttırmış oluruz. Düşük oranda arsenik, antimon veya fosfor katkısı inhibitör olarak etki eder. Zn fakirleşmesinin çok şiddetli meydana geldiği durumlarda ve ortamlarda Bakır-nikel (%70-90 Cu, % 10-30 Ni) alaşımları kullanmak korozyon olayını önlememizde yardımcı olabilir.

#### **2.2.4. Galvanik korozyon**

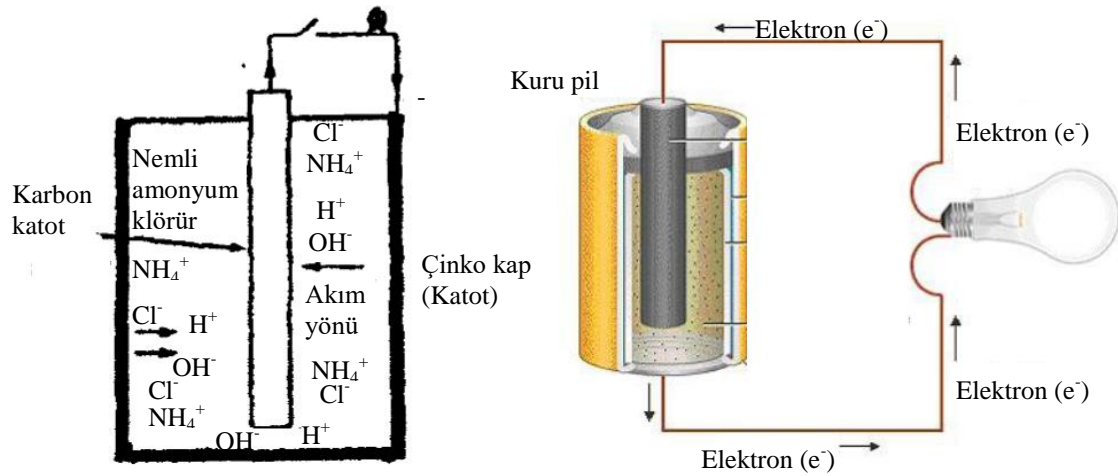
İki farklı metalin bağlantısından ya da temasından dolayı oluşan bu korozyon tipine oldukça fazla rastlanılmaktadır. Bu korozyon tipi korozif olmayan ortamlarda yani korozyon beklenmeyen ortamlarda ortaya çıkabilir ve çok tehlikeli sonuçlar ortaya çıkarabilir. İletken çözeltiliye iki farklı metal daldırıldığı zaman potansiyel bir fark oluşur. Korozyon hızı anot ile katot arasında oluşan bu potansiyel farka bağlıdır. Bu metaller birbirine temas halindeyse ya da aralarında akım oluşturacak bir ortam da iseler bu iki metal arasında elektron akışı meydana gelir. Korozyona karşı direnci az olanın korozyonu artar daha fazla olanın ise azalır. Az dayanıklı olan elektron kaybeden metal anodik, dayanıklı metal katodik olmaktadır. Katot metal yok denecek kadar az korozif etkiye maruz kalır (Şekil 2.10). Korozyonun devam etmesine en fazla sebep olan metaller arasındaki potansiyel farktır.



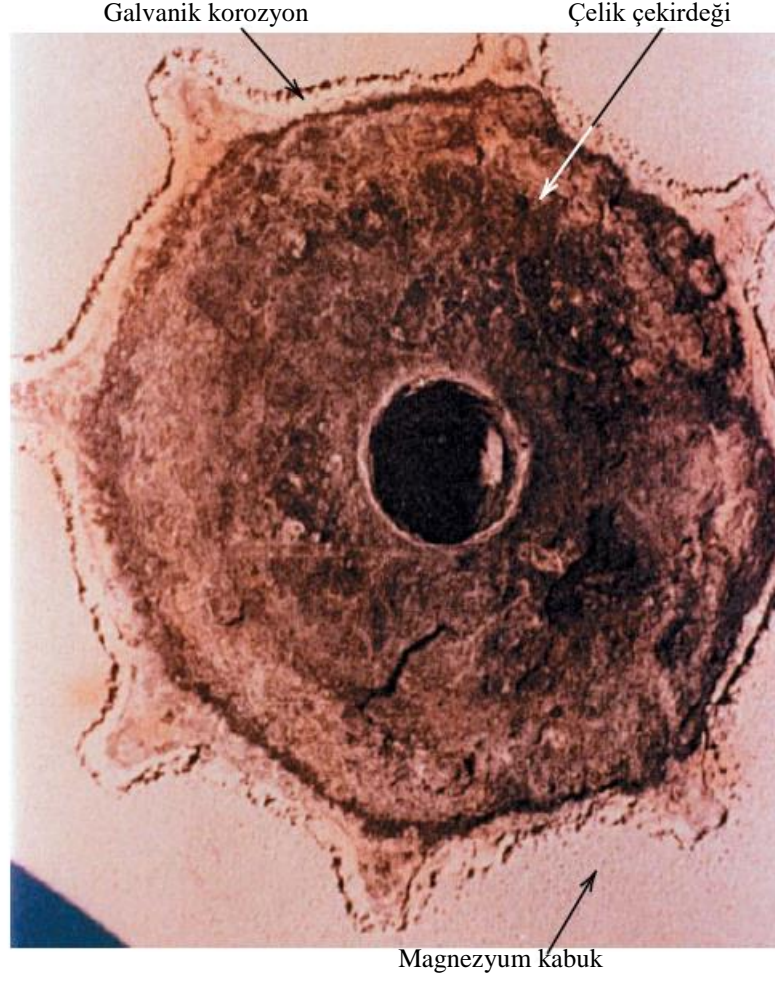


Şekil 2.10 Galvanik korozyon akım şeması

Kuru pil bu korozyon şekline en iyi örnektir. İki farklı metal korozif bir ortama batırılır ve elektriksel bir bağ ile birbirlerine bağlanır böylece bir pil meydana gelir (Şekil 2.11). Bu metallerden daha fazla elektronegatif olan metal anottur ve korozyon burada oluşur. Karbon elektrot, katottur. Korozyona maruz kalan çinko anottur. Fakat magnezyumda anot olarak kullanılabilir.



Şekil 2.11 Kuru pil ile galvanik korozyon arasındaki ilişkilendirme

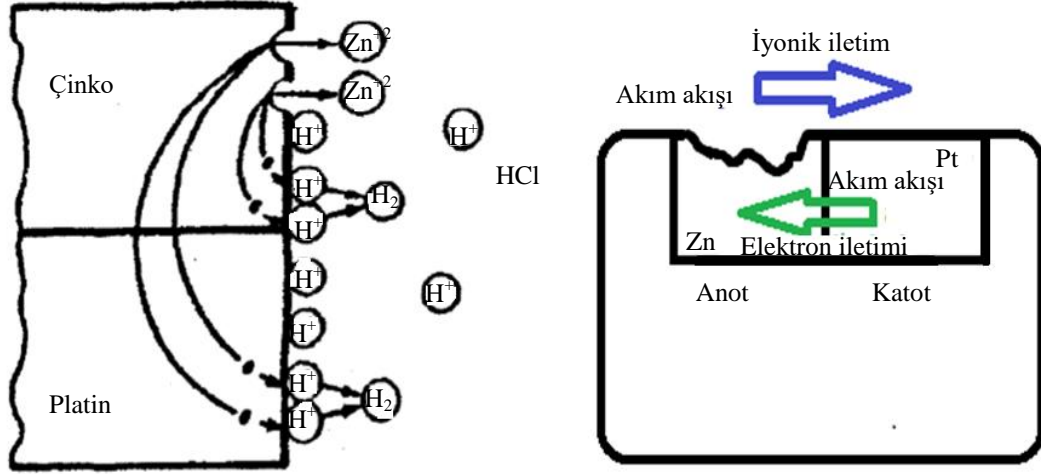


**Şekil 2.12** Balıkçı gemilerinde bulunan tek döngülü sintine pompalarının giriş kısmında oluşan galvanik tipi bir korozyon örneği. Çelik atomunun çekirdeğinin etrafında bulunan magnezyum kabuk arasında korozyon gerçekleşir (William and David, 2013)

Endüstride üretim aşamasında çoğu durumda bağlantı sağlamak amacıyla veya herhangi bir sebepten dolayı iki farklı metal veya birden çok metal birbirleriyle temas ederler. Örneğin HCL çözeltisine batırılmış platin ile birleştirilmiş çinko parçasında Pt ortamda inert olduğundan korozyona uğramaz ve reaksiyon yüzeyini artırır (Şekil 2.13).  $H_2$  kaybı sadece çinko yüzeyinde gerçekleşmez, Pt yüzeyinde de bu kayıp yaşanır. Katalizör etkisinden dolayı Pt yüzeyinden  $H_2$  çıkışı daha hızlı ve kolay olur. Bu durumdan dolayı çinkonun korozyonu hızlanır.

Gerçekleşen korozyon durumunda, iyonları sabit ve denge halindeki metaller aralarında ki galvanik çifti düşük oranda oluşturur. Galvanik korozyon etkileri, en fazla korozyona uğrayan iki farklı tip metalin teması yani elektriksel birleşmenin gerçekleşmesi sonrasında meydana gelir. Korozyonun gerçekleştiği durumlarda metallerin iyonları dengede kalamaz. Bundan dolayıdır ki galvanik seriye bakılması gerekir. Aynı elektrolitik ortamda birlikte bulunan metallere hangi birinin korozyona

uğrayacağını bilmemize galvanik seri yardımcı olur. Mühendislik alanında kullanılan malzemelerinin çoğu alaşımlardan oluştuğu için galvanik çiftler son derece önem kazanmaktadır.



Şekil 2.13 Platin ile birleşik çinko parçasının korozyonu

#### 2.2.4.1. Galvanik korozyonu etkileyen başlıca faktörler

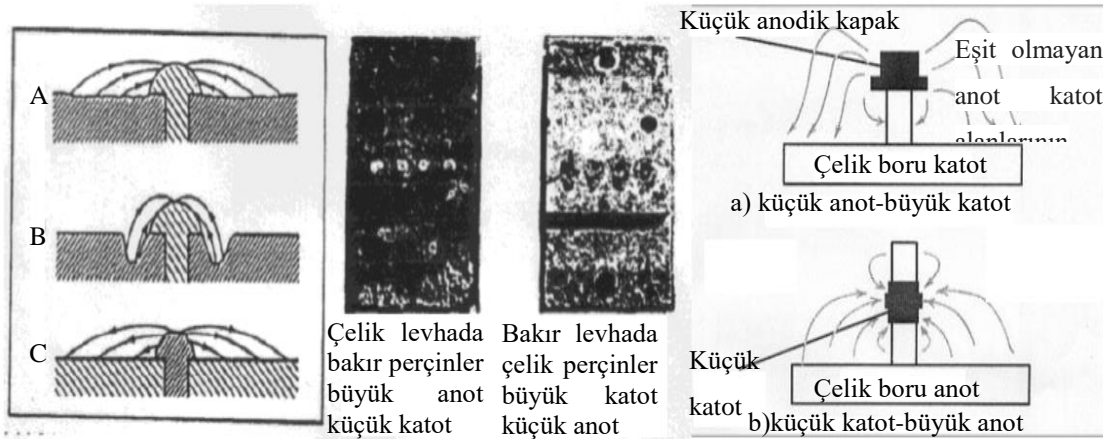
Mesafenin yaptığı etki: Çözeltinin iletkenliği mesafeye göre değişkenlik gösterebilir.

Ortamın etkisi: Ortamın doğası ve koroziyflığı, galvanik korozyonun oluşma düzeyini yani korozyon oranını büyük oranda etkiler. Daha az dayanıklı olan metal genellikle anottur. Bu korozyon olayı atmosferde oluşurken korozyonun şiddetine mevcut nem miktarına ve tipine bağlı olarak oluşur. Örnek verecek olursak deniz kıyısı nemli ve bulunan ortam tuz içerdiğinden dolayı daha iletken ve koroziyftir. Bu sebeple deniz kıyısındaki bölgelerde korozyon olayı kırsal ve kuru tip atmosferlere göre daha fazladır. Elektrolit iletkenliği yüksek ise korozyon metalin yüzeyinde geniş alanlara yayılarak gerçekleşmeye devam eder. İletkenliğin düşük olması durumun da metallerin temas ettiği alanda dar bir bölgede şiddeti yüksek bir şekilde korozyon olayına şahit oluruz. Metaller tam anlamıyla kuru olan bölgelerde temas ettikleri takdirde ortamda iki elektrot arasında akım taşıyacak elektrolit bulunmayacağından dolayı galvanik korozyon görülmecektir.

Alanın etkisi: Katot ve anot yüzey alanları oranı da büyük ölçüde önemlidir. Büyük bir katot yüzeyine oranla anot yüzeyinin küçük olması, anot akım yoğunluğunun yükselmesine ve dar bir bölgede şiddetli bir şekilde korozyon meydana gelmesine sebep olur (Şekil 2.14). Bu duruma karşı tam tersi bir durumda yani katot alanı küçük anot

alanı büyük olur ise akım yoğunluğu düşer ve korozyon hızı azalır. Büyük katot oranı ve küçük anot oranı bu anlatılan sebeplerden dolayı tercih edilmez.

Katodik ve anodik alanlar eşit büyüklükte ise, anodik alanın korozyonu katodik alandan fazla olmaktadır. Böyle bir durumda temas eden yüzeylerden anot tarafı değil de katot tarafını boyayarak kaplamak daha faydalı olacaktır. Bu durumun genel bir örneği, çelik bir malzemeye yapılan bakır perçin ile bakır malzemeye yapılmış çelik bir perçinde meydana gelir. Numunelerin ikisi de 15 ay okyanus ortamına maruz bırakılan perçinli, bakır ve çelik plakalardır. Bakır genelde deniz suyuna yüksek oranda daha dayanıklı maddelerden biri olarak bilinir. Bakır malzeme perçin çivilerle perçinlenen çelik plakalarda bir miktar korozyon oluşmuştur lakin hala daha yüksek daha kuvvetli bir birleşim vardır. Çelik perçin çivilerle perçinlenen bakır levhalarda istenmeyen alan oranı mevcuttur. Çelik perçinli çiviler, komple korozyona uğramıştır. Bütün bu durumlarda bakır ve çelik aralarındaki elektrik potansiyel farkı aynıdır. Anottaki akım yoğunluğundan dolayı oluşan fark değişik korozyon hızları ile netleşmektedir. Sadece korozyon reaksiyonu katot tarafından kontrol edildiği durumlarda alan kuralı kullanılır. Anodik kontrol oluşturulduğunda alan kuralları uygulanmamaktadır. Şekil 2.14'te çelik-bakır çifti üzerinde alan etkisini anlatılmak istenmiştir.



**Şekil 2.14** Galvanik tipi korozyonun hızının katot ve anot yüzey oranına göre değişimi, ve çelik-bakır çiftte alanın etkisi **a)** Küçük yüzey alanlı katot-büyük yüzey alanlı anot ve elektrolit iletkenliği fazla, **b)** Küçük yüzey alanlı katot-büyük yüzey alanlı anot fakat elektrolit iletkenliği az, **c)** Yalnızca Büyük yüzey alanlı katot-küçük yüzey alanlı anot

#### 2.2.4.2. Galvanik korozyonun önlenmesi

Galvanik korozyonu önlemenin birçok yolu vardır. Koruyucu önlemlerin geneli, galvanik korozyonun oluşum durumundan yola çıkılır. Mümkün olduğu kadar farklı metallerin kullanılmasından kaçınılmalıdır. Fakat bazı durumlarda bu mümkün

olmayabilir böyle durumlarda galvanik seride birbirine yakın metallerin kullanılması bize yardımcı olabilir. Büyük katot ile küçük anot birbirine bağlantılı halde bulundurulmamalıdır. Farklı tür metaller kullanılmak zorunda kalınırsa birbirlerine direkt teması kesilmelidir, elektriksel olarak yalıtılmalıdır. Eğer bu farklı metaller yalıtılamamakta ise daha anodik olan kısım kolay de monte olabilecek şekilde montaj edilmelidir.

Yukarıda anlatılanları özetleyecek olursak aşağıdaki yazılan önlemleri almak önemli olacaktır.

- Galvanik seride birbirine yakın olmayan metallerin birbirlerine temasını önlemek son derece önemli bir husustur.
- Bazı durumlarda bu bahsi geçen metaller bir arada kullanılmak zorunda kalınabilir. Bu durumda büyük bir katot yüzeyinden ve küçük bir anot yüzey alanından kaçınmamız gerekir.
- İki farklı metal elementi ile yapılan bağlantılarda izole flanşlar ile birlikte yalıtılarak elektriksel olarak da yalıtılması sağlanmalıdır.
- Metal malzemelerin yüzeyi boya veya çeşitli kaplama yöntemleri kullanılarak izolasyonu sağlanmalıdır.
- Eğer kapalı bir sistem mevcut durumda ise inhibitör kullanılması gereklidir.

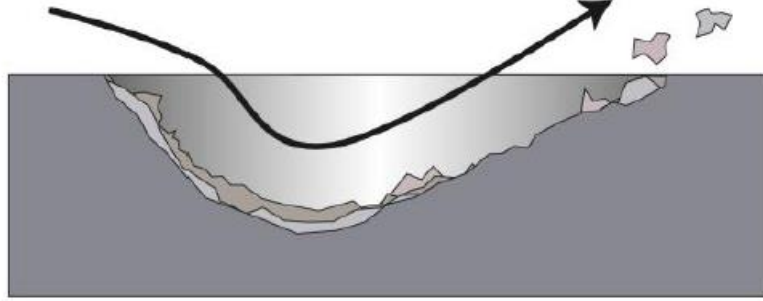
Diyazn yapılırken anot görevi yapan maddenin daha rahat bir şekilde yenilenebilmesi için önlem alınması gerekir. Ya da anot kalın bir şekilde üretilmelidir. Farklı bir şekilde ise sisteme her iki metal malzemeden de daha fazla anodik yapıda olan üçüncü bir madde sisteme dâhil edilerek bağlantısı yapılmalıdır.

### **2.2.5. Erozyon korozyonu**

Erozyon korozyonu, korozif ortam ile metalin temas yüzeyi arasındaki yüksek hız farkından dolayı normal şartlarda oluşacak olan korozyonun hızlanmasıdır. Bu oluşum sırasında hareket hızlı olur ve mekanik aşınma meydana gelir. Korozyona uğrayan metal, iyon veya katı korozyon atıkları olarak yüzeyden atılır. Bazı durumlarda ortamın hareketi korozyonu azaltacak şekilde oluşur; durgun ortam şartlarında meydana gelen bölgesel korozyonu. Korozyona sebep olan malzemelerin metalin yüzeyinden hızlı bir şekilde akması durumunda, korozyon meydana gelirken erozyon durumu da oluşur. Bu olay korozyon hızlanmasına da sebep olur. Buna sebep, meydana gelen korozyon atıklarının akışkan maddeye sürüklenerek metal yüzeyinden itilmesidir (Şekil



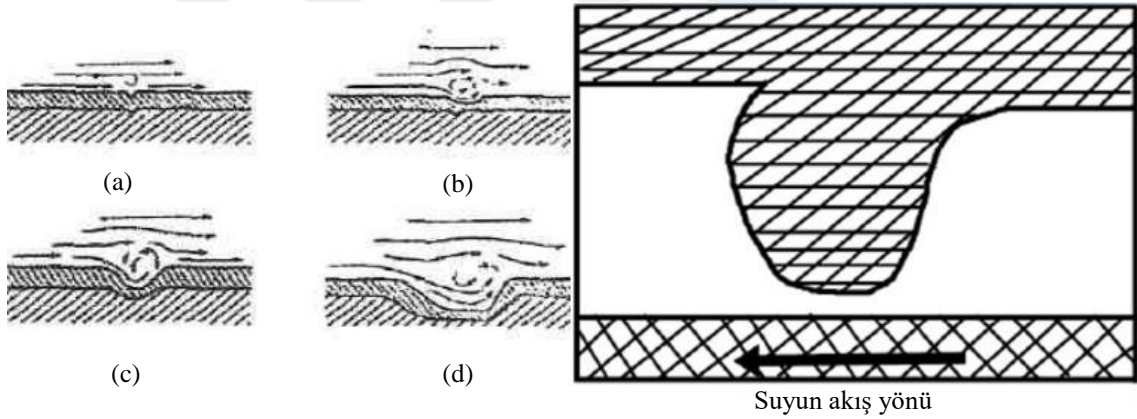
2.15). Erozyon korozyonunun genel görünüşü akış tarafında meydana gelen göz ile görünen çukur şeklinde oyuklar, dalga şeklinde ve dönen girdaplar şeklinde yuvarlak çukurlar meydana gelir.



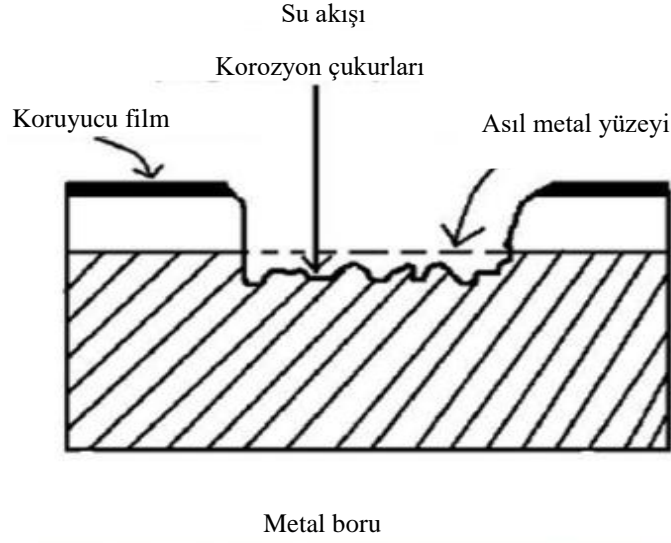
**Şekil 2.15** Oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesi

Bazı Pasifleşebilme özelliği mevcutta bulunan metal malzemeler bu korozyon türüne oldukça yatkındır. Bir örnekle açıklayacak olursak; alüminyum, kurşun ve paslanmaz çeliğin pasifleşme özelliği mevcut olduğundan dolayı erozyon korozyonuna oldukça çabuk uğrar. Bu metal elementlerin yüzey konumunda erozyona maruz kalan alanlarda pasifleşme tabakası oluşmaz ve metal, korumasız olan bu alanlarda şiddetli korozyona meydana gelir. Bakır ve kurşun gibi yumuşak tip metaller erozyon tipi korozyona karşı oldukça dayanıksızdır, korozyonun meydana geldiği ortamlar erozyon tipi korozyon için oldukça önem taşımaktadır. Korozyonun gerçekleştiği ortam gaz, sulu çözelti, ergimiş metal ve organik madde türünde bulunabilir, örneğin sıcak gaz hem metali oksitleyebilme özelliğine sahip, hem de gazı basınçla püskürtürsek koruyucu metalin tabakasını aşındırarak korozyon hızını arttırmış oluruz. Özellikle, bir bileşimdeki katı maddeler korozyon hızını artırır. Sürekli akış hareketinde bulunan akışkanlarda erozyon tip korozyon sıklıkla görülebilir. Bunlara Örnek verecek olursak; pompalar, borular, öğütücüler, dirsekler, karıştırıcılar, valfler, ısı değiştiriciler, santifrüjler, ölçme cihazları, pervaneler, kondansörler, türbin paletleri, sıvı akımını yönlendiren perdeler, kazıyıcılar, bıçaklar ve püskürtme cihazları gibi aletlerde erozyon tipi korozyonu görebiliriz. Bu korozyon tipini etkileyen en önemli etken akışkan hızıdır. Akışkanın akış hızı arttıkça erozyon etkeni de aynı oranda artış gösterir. Akışkanın içerisinde yabancı katı maddelerin bulunması durumunda korozyonun şiddeti artar. Korozyonu başlatıcı etki oluşan küçük oyuğun türbülans etkisiyle artmasıdır (Şekil 2.16). Çoğu işlem sürecinde sıvılar veya soğutma suyu bir boru içerisinde akar. Ekonomik açıdan boru içinde geçen akışkanın hızının en yüksek seviyede olması

gerekmektedir. Ancak çoğu zaman akış hızının laminar olması gerekmektedir. Akış hızının sağlıklı şartlar altında, bakır boru içerisinde 1,5 m/s, çelik çekme boru içerisinde en fazla 1,2 m/s ve paslanmaz çelik içerisinde de 7,5 – 9,0 m/s olması gerekmektedir. Daha hızlı akan akışlar valflere ve diğer bağlantı parçalarına erozyon tip korozyona sebep olurlar. Akış hızını eğer uygun bir seviyeye getirebilirsek erozyon tipi korozyonu önleyebiliriz. Akışkanın boru içindeki hızının yüksek değerler alması durumunda anaför etkisi denilen durum ile birlikte dinlenme meydana gelmesi ihtimali vardır. Karbon içeren çelikten üretimi gerçekleştirilmiş olan boru içerisinden 2,5 - 3,0 m/s hıza sahip su içeren bir çözelti akıyor ise, bu durumda çok hızlı şekilde boru erozyon korozyonuna uğrar. Bu durumu önlemek için akışkanın akış hızını 1,2 m/s'den düşük seviyelere indirmek ya da borunun çapını arttırmak gerekir indirmek veya boru çapını büyütmektir. Diğer çözüm yolu ise paslanmaz çelikten imal edilmiş çelik boru kullanmaktır. Bunun sayesinde erozyon korozyonuna sebep olmadan daha hızlı akış elde edebiliriz.



Şekil 2.16 Erozyon tipi korozyon ve erozyon tipi korozyonun başlama durumu



Şekil 2.17 Metal boru içinde gerçekleşen erozyon korozyonu

Akışkan maddenin hızı dolayısı ile meydana gelen başka bir erozyon korozyonu olayı da, ısı değıştircilerinde kullanılan karbon çeliği ile üretilmiş borularda karşımıza çıkar. Bu tür madde içeren borular korozyon etkisi bulunmayan ortamlarda dahi erozyon korozyonuna maruz kalır. Bu nedenden dolayıdır ki ısı değıştircilerinde kullanılan borunun uzun ömürlü kullanılabilmesi için et kalınlıklarının mümkün olduğu kadar kalın cidarlı üretilmektedir. Her türlü önlem alınmasına karşın erozyon korozyonu meydana gelecek olur ise, boru daha erken delinir ve bu durumun nedeni akışkanın akış hızının beklenen değeri olan 1,2 m/s'den yüksek bir değere ulaşmış olmasıdır. Dış çap sabit kalıp boru et kalınlığı arttırıldığı takdirde boru kesit alanı azalmak suretiyle içinden geçen akışkanın hızı artar bunun asıl sebebi boru kesit alanında ortalama %25'lik bir azalma olup kesit daraldığı için akışkanın akış hızı da artmak zorunda kalır ve karşımıza erozyon korozyonu ortaya çıkar. Isı değıştircilerinin çalışma prensibi dolayısı ile ısıl iletkenliğin yüksek oranda olması beklenir bu sebeptendir ki ısı değıştircilerinin üretiminde genellikle bakır kullanılır ve erozyon korozyonunu önlemek için ise bu bakır elementinin içine üretim sırasında nikel ve alüminyum gibi korozyona karşı dayanıklılığı yüksek elementler karıştırılarak, eşanjörlerin plakalarının arasından geçen akışkanın sebep olacağı erozyon korozyonunu engellemek için korozyona karşı dayanıklı bir metal alaşımı üretilip kullanılması tercih edilir. Aksi durumlarda plakalar ısı etkisine ve akışkanın plakalar arasında akan akışkanın türbülansına maruz kalıp içeride oyuklanmalara sebep olacak bunun sorucunda istenmeyen durum olan erozyon korozyonuna sebep olacaktır. Bu anlatılanlara güzel



bir örnek verecek olursak, (90-10) bakır nikel alaşımı üretilerek deniz suyunun akış hızını 3 m/s hıza kadar arttırmak mümkündür. Alaşımın içine düşük oranlarda demir elementi karıştırılması da faydalı olup bu demir elementi sayesinde deniz suyunda oksit film tabakası oluşturmasıdır.



**Şekil 2.18** Buhar iletim hattında bulunan dirseğin darbelere karşı dayanıksızlığı (Fontana, 1986)

Erozyon tipi korozyonu, borularda, özellikle köşelerde, dirseklerde ve boru çapındaki ani değişikliklerde (redüksiyon) meydana gelir. Akışkanın yön veya akış yönünün değiştiği konumlar türbülansa neden olur. Pervaneler, türbin kanatları, valfler ve pompalar da bu tip korozyon türüne rastlana bilir. Şekil 2.18’de dirseğin erozyon korozyonuna karşı hassasiyeti gösterilmiştir (William and David, 2013).

Bu korozyon türünü önleme çabaları içerisinde çok farklı uygulamalarda mevcuttur. Alaşıma müdahale etmek yerine yani demir ilave edip maliyeti yükselteceğimize akış çözültisi içine  $FeSO_4$  eklenerek de korozyona karşı çözüm elde edebiliriz fakat dezavantajı da pek güvenli bir yöntem olmadığıdır. Metallerin pasifleşme durumu soğutma suyu içerisinde çözülmüş halde bulunan oksijen elementinin etkisi ile meydana gelir. Satabil durumlarda ortamda klorür iyonu olması çelik için tehlikeli duruma neden olur.

Korozyon oluşum durumunda akışkanın akış işlemlerinde türbülans nedeniyle oksijen katot yüzeyine sürüklenir. Türbülans en yoğun etkilenen bölgeler, valfler, bağlantı elemanları ve vanalar gibi akışkanın yüzeye direkt çarparak türbülans oluşturup tahrip ettiği parçalardır. Türbülans nedeniyle metalin iç yüzeyine biriken korozyon atıkları yüzeyinde tabaka oluşturamaz. Bu sebepten dolayı koruyucu bir tabaka bulunmadığından metal malzemenin korozyonu hızlanarak devam eder. Fakat akışkanın

akış hızı korozyon tabakasını uzaklaştıramayacak kadar düşükse, pasifleşme denen olay vukuu bulur. Erozyon tipi korozyona örnekler Şekil 2.19' da ki gibi oluşmaktadır.



**Şekil 2.19** Çeşitli malzemelerden üretilmiş boru iç yüzeyinden başlayan erozyon korozyonunun ilerleyerek borunun dış yüzeyini delmesine kadar geçen süreç

### 2.2.5.1. Erozyon tipi korozyona sebep olan etkenler

*Erozyon tipi korozyona akışkan hızının etkeni:*

Artan korozyon hızının sebebi borunun içinden akan akışkanın hızının artmasıdır. Çeşitli malzeme türleri için her malzemenin kendine özgü kritik hız kriteri mevcuttur. Bu durumda kritik hız eşiğini aşana kadar korozyon etkisi normal düzeyde görülürken eğer bu eşğin aşılması durumunda korozyonun hızı artarak devam eder. Erozyon tipi korozyon olayı, düşük orandaki hızdaki özel ortama tamamen dayanıklı yapıya sahip metallerde bile etkiye sahiptir. Lakin akışkanın boru iç yüzeyindeki akış hızının korozyona ve bu korozyon mekanizması üzerine yapacağı etkiye bağlı olarak artırılır ya da düşürülebilir. Örneğin, akışkandaki akış hızı metalin iç yüzeyinde oksijen, karbondioksit veya hidrojen sülfür ile temasına sebep olarak ya da daha değişik bir ifadeyle borunun iç yüzeyinde ki tabakanın kalınlığını düşürüp, iyonların difüzyonunu hızlandırarak çelik borunun korozyonunu hızlandırabilme özelliği mevcuttur. Farklı bir boyuttan incelenecek olursa, yüksek akışkan hızına sahip akışın aralık türü korozyona sebep veren kir ve tortuların borunun iç kısmında toplanmasını engel olarak korozyonu azaltabilir. Paslanmaz çeliklerin ve alüminyumun dumanlı nitrik asit ortamı içerisinde ki erozyon tipi korozyonu araştırılmış ve çok farklı bulgulara rastlanılmıştır. Boru içerisinden geçen akışkanın hızı yükselir iken alüminyum üzerindeki korozyon artar ve paslanmaz çelik üzerinde ki korozyon da azalma görürüz. Bunun sebebi bu iki farklı malzeme üzerinde gerçekleşen korozyon mekanizmasının değişiklik göstermesidir. Stabil bir ortamda nitrik asit içerisindeki bu paslanmaz çelik oto katalitik olarak korozyona uğrar, bu duruma etken katodik reaksiyon atığı olarak nitroz asit ortaya çıkar. Akışkan hızının yükselmesi ortaya çıkan nitroz asidi metal yüzeyi üzerinden uzaklara itekler. Çoğu paslanmaz çelik, deniz suyu veya klor iyonu bulunduran ortamlarda çukur ve çatlak tipi korozyonlara karşı oldukça dayanıksızdır. Lakin bu maddelerin büyük kısmı, deniz suyunun hareketi sonucu, deniz içerisinde sıkıntısız bir şekilde kullanılmaktadır. Gerçekleşen bu gelgit ya da dalgalanma dolayısıyla oluşan deniz suyunun yaptığı hareketlilik korozyon atıklarının belli bir noktada toplanmasına engel olur ve çukurların meydana gelmesini geciktirici düzeyde bir durum ortaya çıkarır.

*Erozyon tipi korozyona akışkanın akışından dolayı meydana gelen türbülans olayının malzeme yüzeyine yaptığı etki:*

Genellikle erozyon tipi korozyonun meydana gelmesinin yegane sebebi akışkanın akışından dolayı meydana gelen türbülans olayıdır. Türbülanslı akan akışkan laminer devam eden akışkanın akışına göre çok daha yüksek çalkalanma olayı yaratır ve bu durum daha fazla metal yüzeyi ile korozyif ortamın temasına sebep verir. Akışkanın sebep olduğu türbülanslı akış en fazla ısı değiştiricilerindeki boruların giriş uçlarında meydana gelir. Korozyon başlangıcı giriş uçlarının ilk 2 santimetrelik kısmında oluşur. Bunun sebebi giriş kısmında redüksiyon olması nedeni ile büyük çaptan küçük çapa geçiş olması sureti ile akışkan bu aradan geçerken türbülans yaratır. Borunun ilerleyen kısımlarında laminer akış olarak devam eder akışkan ve bu durum korozyonu borunun alt kısımlarına doğru ilerleyerek devam ettirir. Bu tip cihazlarda meydana gelen akışkanların akış türü, borunun içerisinde olan sulu çözeltinin ya da gazın çözelti miktarı ve akışkanın hızına bağlı bulunduğu gibi, bu cihazların çalışma prensibine ya da kullanım amacına bağlı olur. Cihaz içindeki akışkanın akış hızının Yüksek olmasının yanı sıra cihazdaki raf şekli kısımları, keskin dönüşler, yarıklar ve birikintiler laminer akış düzenini yok eder ve türbülanslı akışa dönüştürür bu durumdan sebeple erozyon tipi korozyona sebep olur.

*Erozyon tipi korozyonda akışkanın yüzeye çarpması ile oluşan etki:*

Erozyon korozyonuna sebep olan etkenlerden biri de akışkanın metal iç yüzeyine yaptığı çarpma etkisi olarak bilinir. Bu çarpma durum genellikle, buhar türbininin kanat kısımlarında, boruların dönüş için kullanılan dirsek kısımlarında, uçların dış bölümlerinde, siklonlarda ve buna benzeyen fabrikasyon parçalarda meydana gelir. Sulu ortamda bulunan katı ve bazen gaz kabarcıkları bu çarpışma sonucu ortaya çıkar. Meydana gelen bu hava kabarcıkları, çarpışma sonuç oluşan erozyon korozyonunu hızlandıran en önemli etkidir. Şöyle bir örnek verebiliriz, Petrol rafinerisinde 485°C sıcaklığa sahip petrol ve akışkan katalizör ile iletişim içinde olan sürgülü bir vana bir yıldan kısa sürede çarpma nedeniyle çok yüksek oranda erozyon korozyonuna maruz kalır.

*Erozyon tipi korozyona galvanik etken:*

Akan bir sistemde, galvanik seride uç noktalarda bulunan iki farklı metal birbirlerine dokunmuş durumdaysa, galvanik etken erozyon korozyonuna büyük ölçüde etkide bulunur. Bu galvanik etki durumu, normal şartlar altında, korozyona neden olmazken akışkanın aktığı bölgede erozyon korozyonu üzerinde yüksek oranda etki eder. 316 tipi paslanmaz çeliği, yüksek hızlarda ortamda yalnız olduğu durumda

korozyon olayına rastlamak mümkün değildir. Eğer bahsedilen bu alaşımı kurşun elementi ile irtibat halinde bulundurulursa korozyonun yüksek hızla başlayıp devam ettiğini göreceğiz. Bu bölgede gerçekleşen akış sonucu, pasif olan film yüzey tabakası, galvanik ve erozyon korozyonun etkisiyle yıpranır. Kurşun ve 316 paslanmaz çeliği alaşım çifti sabit ortamda, korozyon oluşturmaz.

*Erozyon tipi korozyon olayının maddenin içyapısına yaptığı etki:*

Erozyon korozyon şartları etkisi altında kalan maddenin performansını maddenin metalurjik yapısını, kimyasal bileşeni, sertliği, korozyona karşı olan direnci etki etmektedir. Metali oluşturan birleşimi, metalim korozyona karşı gösterdiği direncini belirleyen en büyük etkendir. Madde aktif metalse ya da aktif metallerden oluşan bir alaşıma sahipse bu maddenin korozyon direnci, koruyucu film yüzey tabakasının oluşmasına ve oluşan bu tabakanın sürekliliğine de bağlı olduğu görülür. Korozyona karşı gösterdiği direnci yüksek olan bir madde, meydana gelen bütün şartlar eşitlendiği takdirde, korozyona karşı daha düşük dirence sahip maddeye göre daha yüksek performansa sahiptir. Örneğin; %80 Nikel ve %20 krom elementlerinden oluşan alaşımı, %80 demir ve %20 krom elementlerinden meydana gelen alaşımından daha üstün görülür. Bunu sebebi nikel demirden daha yüksek oranda korozyona karşı direnç gösterir. Bu duruma istinaden nikel bakırdan meydana gelen alaşım, nikel bakır elementlerinden oluşan alaşımdan daha üstündür. Alaşımlara eklenen üçüncü bir elementin, erozyon korozyonuna karşı direncini yükseltici etkiye sahiptir. Bakır nikel elementlerinin oluşturduğu alaşıma demir eklenirse, deniz suyunda meydana gelebilecek olan erozyon korozyonuna karşı korozif direnci arttırılmış olacaktır. Buna benzeyen başka bir olay ise, 18-8 paslanmaz çeliğine, molibden eklenirse meydana gelen 316 paslanmaz çeliği, korozyon ve erozyon korozyonuna karşı göstermiş olduğu direnç çok fazla oranda artmış olacaktır. Bu anlattığımız her durumda üçüncü metal elementinin alaşımlar içine eklenmesi yüksek oranda sabit koruyucu bir film tabakası oluşturur. Al pirinçleri, Alüminyumsuz pirinçlere oranla yüksek erozyon tip korozyona karşı direnç meydana getirir. Yumuşak yapıya sahip metaller, erozyon tipi korozyona karşı fazla duyarlı etkileşim içinde bulunurlar. Maddenin sahip olduğu sertlik mekanik erozyona karşı gösterilen dirençte belirleyici bir faktördür. Isıl işlem uygulamaları, maddenin mikro yapı sisteminde değişimler oluşturduğunda dolayı erozyon korozyonuna karşı direnen etkiye sahip olmayacağından kullanışlı bir yöntem olamayacaktır. Dökme demirin bazı durumlarda çelikten daha fazla, oluşan erozyon

korozyon şartlarında iken bu korozyona karşı göstermiş olduğu üstün direnç bilinmektedir. Özellikle sıcak derişik sülfürik asit içinde göstermiş olduğu direnç.

*Erozyon tipi korozyonun oluşmaması için gerekenler:*

Erozyon tipi oluşan korozyonları en aza indirmek amaçlı aşağıdaki gibi listelenebilir.

Erozyon tipi korozyona dayanacak bir element seçilmelidir.

Diyazn yapılırken erozyon korozyonu etkisini düşürebilecek koşullar göz önünde bulundurularak ona göre bir tasarım yapılması uygun olacaktır. Buna göre, boru çapı yükseltilir ya da akışkanın akış hızı azaltılmaya çalışılır. Erozyon tipi korozyona karşı dayanıksız görülen bölgenin et kalınlığı artırılmalıdır.

Akışkan akış sırasında peşinde katı atıklar sürüklüyorsa, bunlar önceden çökertilerek sıcaklığın düşürülmesi ile de erozyon tipi korozyon olayının şiddeti düşürülür. Yanı ortamın korozif etkisi azaltılmak hedeflenir.

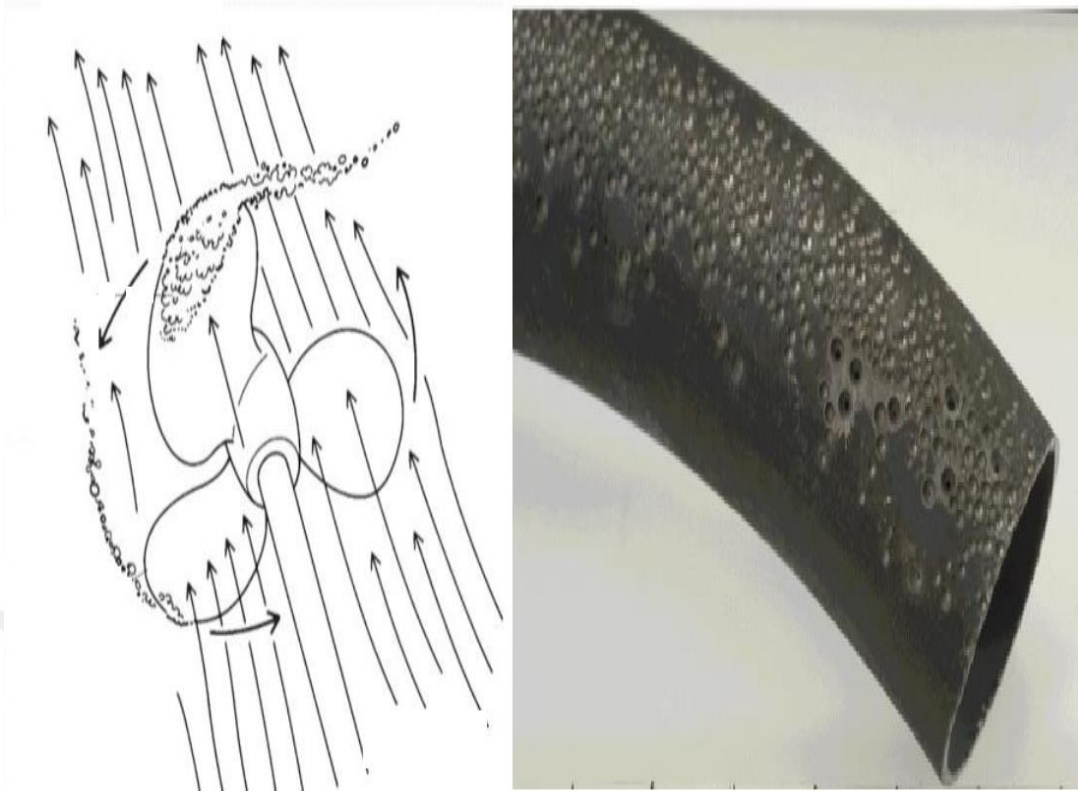
Boru ile akışkan ortam arasında temas yüzeye sert bir kaplama uygulanarak çözülebilir.

Katodik koruma Uygulanarak erozyon tipi korozyonu önlemiş olur.

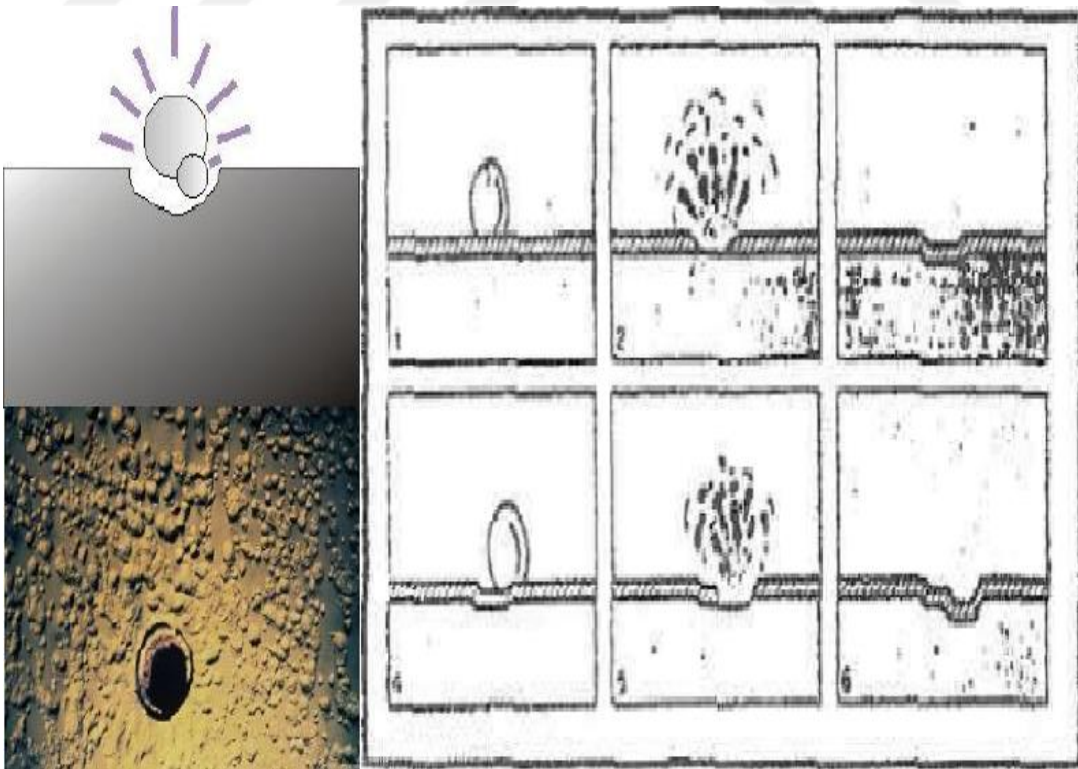
#### **2.2.6. Kavitasyon korozyonu**

Kavitasyon, erozyon tipi korozyonun durumundan daha ayrıntılı bir olaydır. Akışkan içerisinde akışkan ile beraber sürüklenen gaz veya su buharı kabarcıklarının sürüklenmesi durumunda, bu basınçlı gaz metal iç yüzeyi içerisinde bulunan engel sebebiyle patlar ve o kısımda yüksek ölçüde tahribat yaratır. Bu korozyon durumu özellikle hidrolik santrallerin türbinlerde, gemi motorlarının pervanelerinde ve pompaların paletlerinde meydana gelir. Kavitasyon korozyonunun oluşum mekanizması şu şekilde gözlenir: Hızlı şekilde akan akışkan akışı esnasında herhangi bir noktada veya bölgelerde basınçta bir düşme gözlemlenir. Bu kısımlarda düşük basınç sebebiyle su buharlaşır buhar kabarcıkları meydana getirir. Oluşan bu buhar kabarcıkları metal yüzeyinin pürüzlü herhangi bir noktasında engel teşkil olacak durumda patlar ve parçalanır ve metalin yüzeyinde çukur meydana getirir. Kavitasyon korozyon mekanizmasının oluşumu ve oluşan kavitasyon nedeni ile metal yüzeyinde oluşan çukurcuklar da aşağıdaki Şekil 2.20'de gösterilmektedir.





Şekil 2.20 Pervanede ve boru yüzeyinde meydana gelen kavitasyon tipi korozyon



Şekil 2.21 Kavitasyon korozyonunun meydana geliş prosesi ve kavitasyon sonucu meydana gelen çukurcuklar.

Standart gerçekleşen akışlarda çok yüksek hıza sahip bazı kısımlarda vakum meydana getirebilir. Buna bağlı olarak sulu çözeltilerde buharlaşma meydana gelebilir ya da sıvı içerisinde bekleyen çözülmüş gazlar ortamdan uzaklaşır. Böylece sıvı içerisinde alçak basınca sahip gaz kabarcıkları oluştuğu görülür. Oluşan kabarcıklar akışkanın akış hızının yoğunluğunun düştüğü kısımlarda, çoğunlukla metalin yüzeyinin yakınında söner. Gerçekleşen bu durum metal yüzeyinin üzerinde kuvvetli bir vakum etkisi yaratarak metalin yüzeyinde çukurcuklar gerçekleşmesine sebep verir (Şekil 2.21). Gerçekleşen istenmeyen bu olayı proje yapımı esnasında alınan bazı önlemlerle giderilebilir ve proses süresince bu kavitasyon tipinde erozyon korozyonu gelişmesi önlenmiş olur. Kavitasyon korozyon tipinde erozyon olayı ile çok fazla karşılaşılmasına karşın ince korozyon film tabakalarını sökerek uzaklaştıran erozyon durumuna oldukça sık rastlanır. Böylelikle kavitasyon tipi korozyona yakın bir korozyon durumu oluşur. Kavitasyonlu erozyon ile kavitasyonlu korozyon durumları birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkarmasına karşın birbirlerinden değişik bir biçimde oluşurlar. Kavitasyon tipi korozyon durumu inhibitör ya da katodik koruma gibi yöntemlerle engellenebildiği halde, kavitasyonlu erozyon da bu yöntemler pek işe yaramaz. Kavitasyon erozyonunun gerçekleşmesini sadece tasarım aşamasında aldığımız önlemlerle engel olabiliriz. kavitasyon korozyonu ve Kavitasyon erozyonu durumları genellikle birbirleri ile karıştırılabiliyor.

### **2.2.7. Fretaj korozyonu**

Fretaj tipi korozyon olayı titreşim ve kayma hareketi yük uygulanması durumunda maddelerin birbirine temas halinde olması durumunda gerçekleşen korozyon türüdür. Bu korozyon türü korozyon atıklarıyla etrafı sarılmış olan malzeme yüzeyinde yivler ve çukurcuklar şeklinde meydana gelir (Şekil 2.22). Fretaj türü korozyonu ovularak aşınma, sürtünme oksidasyonu, aşınma oksidasyonu gibi isimlerle de adlandırılabilir. Fretaj aslında erozyon tipi korozyonunun özel bir türü olup sıvı çözeltiler dışında atmosferde olur. Fretaj korozyonunda, metalik alaşımlar aşınıp tahrip olurken oksijen kalıntıları oluşur yani sonuç olarak aşırı tahribat ortaya çıkar ve çok zararlıdır. Bu korozyona örnek olarak demiryolu travers bağlantı noktalarında karşılaştığımız korozyon türü verilebilir. Bu noktaları gerekli yağlama işlemlerinin yapılmadığından sebeple sürekli sıkıştırmak gereklidir.





**Şekil 2.22** Fretaj korozyonu

Fretaj korozyonunun gerçekleşebilmesi için gerçekleşmesi gereken bazı şartlar vardır bu şartlar aşağıda belirtilmiştir;

Ara yüzey aşırı derecede korozyon atığı ile dolu olmalı,

İki metal yüzeyi arasında tekrarlanarak devam eden titreşim veya bağıl kayma hareketleri olmalı,

Fretaj tip korozyonu ortaya çıkaran yüzeyler arasında bağıl kayma hareketi 10-8 cm arasında oldukça düşük seviyededir.

Devamlı olarak dönme hareketi yapan, bilyalı yataklar ya da mil yatakları ara yüzeylerinde fretaj tipi korozyona rastlanmaz. Fretaj tipi korozyonun meydana gelebilmesi için yük ve devam eden bağıl hareketlerin gerçekleşmesi gerekmektedir. Fretaj korozyonu tren ya da gemiyle uzak ülkelere taşınan araçların aks kısımlarında görülebilir. Araçların transferi sırasında devamlı olarak titreşim hareketi görülür ve korozyona sebep verir. Normal şartlarda gözlemleyecek olursak araçların standart olarak çalışması durumunda mil yatakları arasında oluşan bağıl hareket çok yüksek ölçüde olduğundan dolayı fretaj tipi korozyon meydana gelemez.

Fretaj korozyonu iki adet mekanizmaya sahiptir;

- Oksidasyon-aşınma mekanizması.
- Aşınma-oksidasyon mekanizması,

Oksidasyon-aşınma mekanizması: Metal malzemelerin yüzeyleri atmosferik oksidasyondan sebebiyle ortaya çıkan ince oksit film tabakalarıyla korunurlar. Metaller yüke maruz kaldığında temas eden yüzeyde bağıl hareketin devamı sırasında oluşan bu ince oksit tabakası parçalanır ve oksit parçaları metalin yüzeyinde toplanır. Bahsettiğimiz bu mekanizmada asıl konu sürtünme etkisi sırasında gerçekleşen hızlı oksidasyondur.

Aşınma-oksidasyon mekanizması: Basınç altında bulunan metal ara yüzeylerinde birleşme ve soğuk kaynak görülür. Daha sonraki bağıl hareket esnasında temas eden bu noktalar parçalanır ve metal kırıntıları metalin yüzeyinden koparak uzaklaşır. Bu atık parçacıkların çapları küçük olduğu için sürtünme sırasındaki meydana gelen ısı nedeniyle oksitlenir. Bahsi geçen bu durum tekrar ettikçe metal kaybolmaya devam eder ve metalin yüzeyinde oksit artıkları birikir. Aşınma-oksidasyon teorisi gereğince ilk sürtünme ile aşınma etkisi görülür ve bu durumun tekrarlanması sonucu oksitlenme oluşur.

Yapılan çalışmalar sonucu yukarıda bahsi geçen mekanizmaların her birinin fretaj tipi korozyonun meydana gelmesine sebep olduğu ortaya çıkmıştır. Bu iki durumda da oksit tabakası yoktur. Oksijenin ortamlarda bulunması çoğu madde üzerinde özellikle demir ile oluşan alaşımlarda, fretaj tipi korozyonu daha da hızlandıran bir etki ortaya çıkarır.

#### **2.2.7.1. Fretaj korozyonu önleme yolları**

Fretaj korozyonunun önüne geçebilmek için birçok yöntem uygulanabileceği gibi aşağıda anlatılan birkaç uygulama ile de önlenbilir ya da en küçük seviyelerde korozyonun görülmesi sağlanabilir.

Birbirine temas halinde bulunan maddelerden birinin veya birkaçının sertliğini arttırmak fretaj korozyonuna engel olur. Sert yapıya sahip maddeler yumuşak yapıya sahip maddelerden daha fazla direnç gösterirler. Soğuk işlem İşlem uygulayarak maddenin yüzey sertliğini yükseltmekte fretaj tipi korozyona karşı olan direnci fazlaştırır.

Viskozitesi yüksek olan gres ya da yağla yağlamak madde yüzeyinde sürtünmeyi azalttığı için oksijenin yüzeyde toplanmasına engel olur. Ayrıca yağlarla beraber fosfat kaplamalar kullanmakta faydalı olur. Bu tür kaplamalar poroz yapıya sahip olup, yağ deposu olma özelliğindedirler.

Yüzeyi kabalaştırmak metaller arasındaki sürtünme katsayısını arttıracak genellikle, malzemelerin taşınması esnasında titreşimin meydana geldiği yatakların yüzeyleri kurşun ile kaplanarak fretaj korozyonu önlenmiş olur. Yatak çalışmaya başladığında ise kurşun kaplama çok hızlı bir şekilde tahribata uğrar.

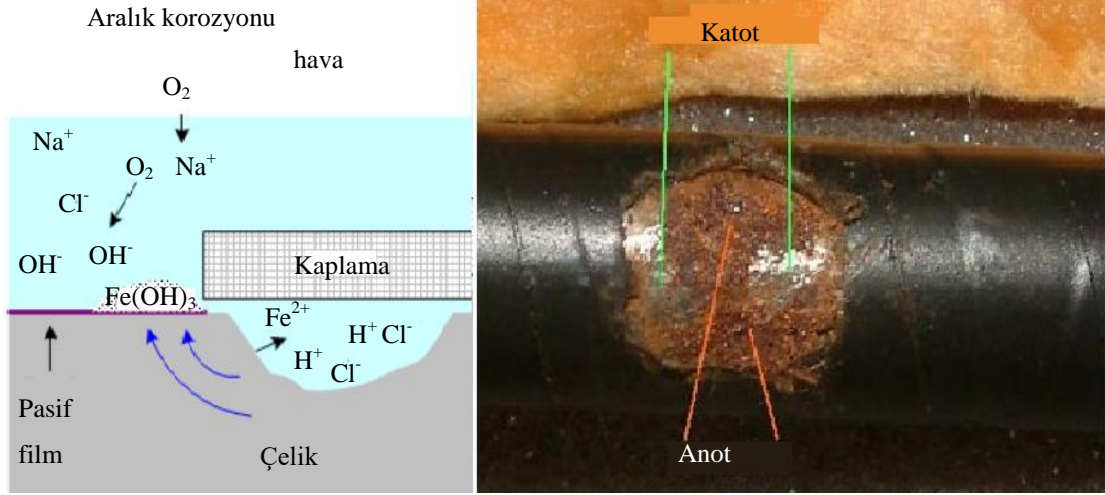
Atmosferde serbest halde oksijenin ortama girmesini ve titreşimi kesmek için yatak yüzeylerine conta denilen plastik ara elemanlar kullanmak gerekir. Bu conta dediğimiz malzeme hem iki metalin birbirine direkt teması engellenmiş olur hem de oksijen atomlarının o yatak arasından girişi engellenerek ortamda korozyonun gelişmesi önlenmiş olur.

Maddeler arası bağıl hareketi arttırmak.

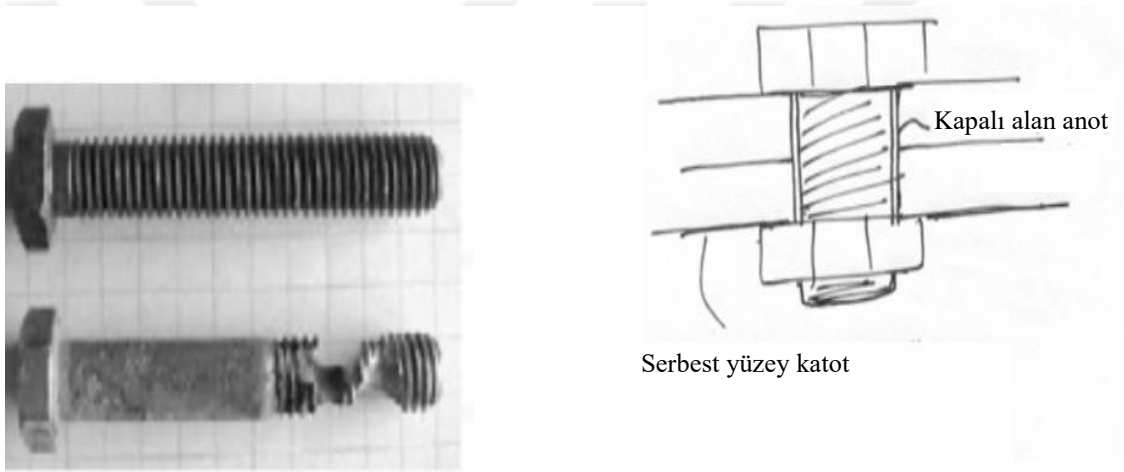
Maddelerin ara yüzeylerindeki temas noktalarında kayma ihtimalini engellemek için yükü çoğaltmak.

### **2.2.8. Aralık (krevis, çatlak) korozyonu**

Aralık korozyonu, aralarındaki teması kuvvetli olmayan iki metal yüzeyi arasında ki kalan bölgede boşluktan dolayı, bu boşluk bölgelerinde meydana gelen oksijen oranlarındaki farklılıklar nedeni ile gerçekleşir. Metalin yüzeyinde olan dar bir aralık, ince bir çatlak, cep veya iki levhanın arasında oluşan aralık içine ortamda bulunan elektrolit maddenin bu aralıklardan geçmesi zor olur. Metaller arasında bulunan dar kısımlar hareketsiz bir bölge yaratır. Bu kısımlarda korozyonun hızı diğer düzgün yüzey alanlarına oranla daha yüksektir. Bu tarz korozyon olayının gerçekleşmesi çatlak korozyonu olarak adlandırılır (Şekil 2.23). Contalarda oluşan hatalı aralıklar, metallerin veya bağlantı aparatlarının yüzeylerinde bulunan pislik, cıvata ve somun başlıkları bağlantıları esnasında aralarındaki oluşan aralıklar bu tür korozyonun başlıca sebeplerindedir (Şekil 2.24). Değişik tüm malzemelerde meydana gelebilme özelliği vardır.



Şekil 2.23 Aralık korozyonu



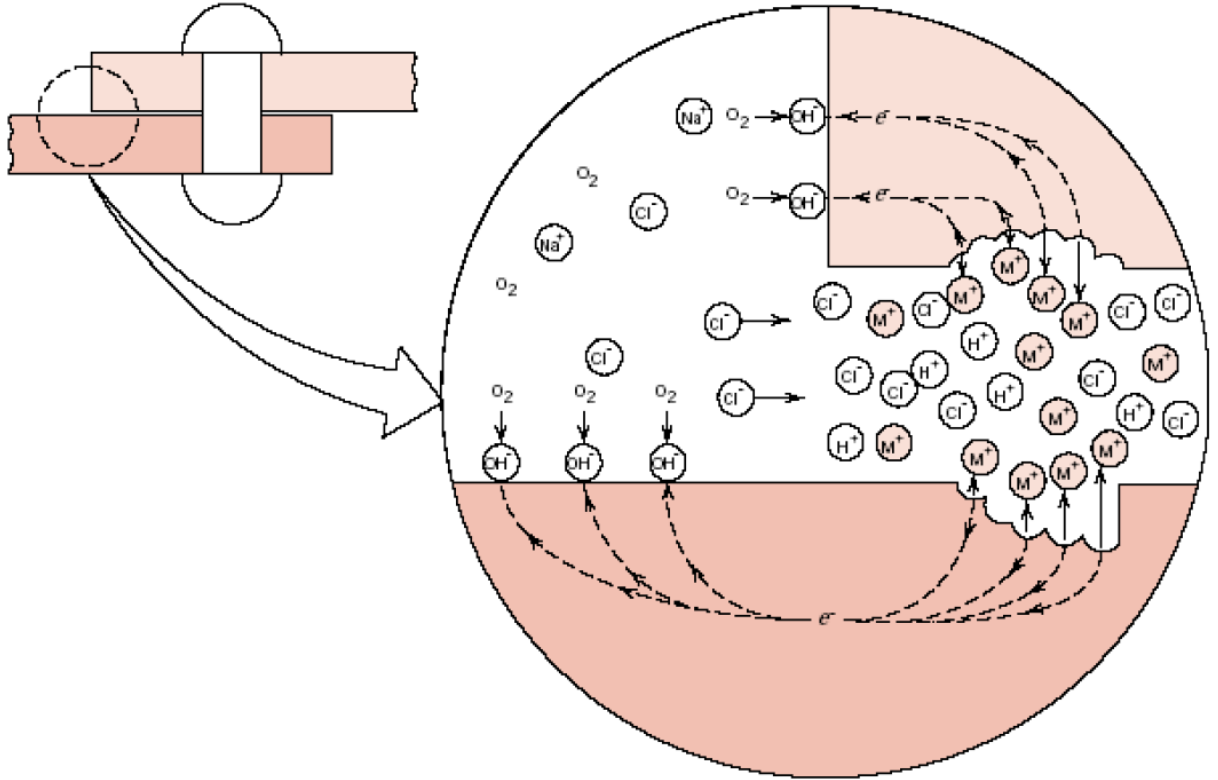
Şekil 2.24 Somun-vida bağlantısında gerçekleşen aralık korozyonu olayı

Klorür bulunduran bir ortamda bulunan demir için aralık tipi korozyon gelişim mekanizmasını şu biçimde anlatabiliriz: Korozyon reaksiyonu başladığında reaksiyonlar çatlak içinde ve dışında hızlı bir şekilde oluşur. Demir iyon durumuna geçtiği sırada elektronlarını oksijene iletir ve  $O_2$  iyonu meydana getirir. Böylelikle çözeltiliye iletilen her metal iyonuna karşın iki adet hidroksil iyonu meydana gelir. Reaksiyonlar bir süre daha bu şekilde devam ettikten sonra yarık içerisinde bulunan oksijen iyonları biter. Yarığın içi hareketsiz bir ortam olduğundan dolayı metal yüzeyinden ayrılan oksijen elementinin yerinin doldurulması imkânsızdır. Oysaki yarık haricindeki bölgelerde kaybedilen oksijen atomlarının yeri doldurulacağından dolayı bu kısımlarda korozyon gelişim hızında bir değişiklik olmaz. Korozyonun başladığı sırada çatlakın iç kısmında ve yüzey kısmında katot ve anot kısımları meydana gelmesine rağmen çatlakın içinde oksijen atomlarının bitmesinden sonra çatlakın dış kısımlarında oksijen

reaksiyonlarının, çatlağın iç kısmındaysa metalin çözünme durumunun devam ettiğini görürüz. Bu sebepten dolayı demir iyonlarının konsantrasyonu yükselir. Yükselen Fe konsantrasyonu sebebi ile polar etkiler meydana çıkar ve  $Cl^-$  iyonlarının çatlak içine doğru akmasına sebep olur ve çatlağın içinde  $FeCl_2$  oluşur. Meydana gelen bu bileşik su içinde kolayca hidrolize uğrayarak aşağıda belirtilen reaksiyon ile demir hidroksil şeklinde dibe çöker.



Gerçekleşen bu hidroliz reaksiyonu sonunda çatlak içerisinde dibe demir hidroksit çökerken HCl konsantrasyonu da git gide yükselir. Bundan sonra asidin etkisi altında kalan çatlakta metalin çözünmesi daha kolay olur ve çözünme olayı çatlağın içerisinde hızlanarak devam eder. Bu tip korozyon olayı takip eden reaksiyonların yardımıyla oto katalitik olarak büyüyerek devam eder. Çatlak içerisindeki çözünen klorürün oranı yakın zamanda 3 ile 10 kat arasında bir artış gösterecektir. pH oranı ise 3 kadar iner. Çatlağın iç kısmında metalin erimesi yarık dışında kalan kısımların katodik koruma etkisi sağlayarak yarığın kenarlarında paslanma durumu görülmez. Deniz suyu içindeki iki çelik maddeden oluşan perçin ile levha arasında oluşan aralık korozyonu ve korozyonun ilerleyiş mekanizması Şekil 2.25 'de verilmiştir.



Şekil 2.25 Aralık korozyonu oluşum mekanizması (William and David, 2013)

Aralık tip korozyonu sadece Şekil 2.25’de verilen şekilde gözlemlendiği gibi klorürlü ortamlarda gerçekleşmez daha az şiddetli olarak tüm sıvı çözeltiler içine gerçekleşebilir. Buna karşılık bilmemiz gereken, klorür içermeyen ortamda korozyon etkisini ortalama bir yıla yakın bir sürede anca gösterir. Pasifleşebilme özelliği gösteren ya da hidroksit şeklinde çökelebilen metal ve metal alaşımları aralık tipi korozyona daha fazla maruz kalırlar.

### **2.2.8.1. Paslanmaz çeliğin aralık korozyonu**

Sulu ortam içerisinde bulunan paslanmaz çeliklerde korozyon yaygın olarak bağlantı malzemeleri dolayısıyla oluşan boşluklarda oluşur. Conta aralıklarında, birbiri ile teması tam olarak gerçekleştirilememiş bağlantı kısımlarında, kaynaktan kaynaklanan hatalardan dolayı ve yüzeylere temas eden çözeltilerin değişmesinden dolayı malzemenin genelinde değil de aralık gösteren kısımlarında meydana gelen korozyon türüdür.

Paslanmaz çeliğin bazı kısımlarda oksijen atomu oranlarının değişmesi, oksijen atomlarının düştüğü kısımlar anot rolü görüp çözünmenin sebebi olur.

Aralık içine çözeltili girebilecek kadar geniş fakat ortamdaki iyonların ayıramayacağı kadar dar aralıkların olması lazımdır. Paslanmaz çeliğe dokunan iki ayrı sıvı çözeltili kısmı arasındaki potansiyel farklılıktan sebeple aralık korozyonu meydana gelmektedir.

Paslanmaz çeliklerde aralık korozyonunun meydana gelebilmesi için koruyucu görev yapan film tabakasının ortadan yok olması ve bunun devamı olarak sürekli olarak anlatılan dar aralıkların içerisinde korozyonun yürümesidir.

Paslanmaz çeliklerde sürekli olarak gelişen ve devamlı zarar veren bu aralık korozyonunu önlemek için tasarım ve üretim sırasında yüksek molibden ve kromlu alaşımlar kullanılarak ya da aralık tipi hataların oluşmasını engel olmak gerekir.

Özellikle 18-8 paslanmaz çeliklerinde aralık korozyonu ile oldukça fazla karşılaşırız. 18-8 paslanmaz çeliğinden üretilen cıvatalar aralık tipi korozyon nedeni ile oldukça kısa sürede paslanırlar.

Paslanmaz çeliklerde ve alaşımlarında gerçekleşen aralık korozyonu Şekil 2.26’da ki örnekte karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.26 Paslanmaz çelikte meydana gelen aralık korozyonu

### 2.2.8.2. Aralık tipi korozyonun önlenmesi

Cıvata somun ve perçin yerine kaynaklı bağlantılar yapmak aralık korozyonu olma ihtimalini azaltır,

İki levhanın üst üste binip birleştirildiği bölgeler kaynak veya lehim yapılarak etrafı kapatılmalı ki aralık oluşumu engellensin.

Sulu çözelti içeriği taşıyan kaplar proje aşamasında iken kabın boşaltma esnasında içinde çözelti kalmayacak biçimde boşaltılabilmemesine dikkat edilmeli kabın içerisinde temizlenemeyen ya da yıkanamayan bölge kalmaması için dizayn edilmeli.

Kap içerisinde çökelti veya kalıntı kalıp kalmadığına dikkat edilmeli periyodik zamanlarda kontrolü sağlanmalıdır.

Cam, tahta, plastik vb. ıslak şekilde kalan maddelerin Metallerin yüzeyi ile iletişimi engel olunmalıdır.

Teflon gibi absorb etme durumu bulunmayan yani vuruntuya karşı direnci olmayan rijit contaları uygulamada kullanmamak gerekir.

Tesiste üretim belli bir zaman durdurulacaksa ıslak conta veya buna benzeyen malzemeler ile metaller arası temas önlenmeli ve homojen bir ortam yaratılmalıdır.

### 2.2.9. Homojen korozyon

Homojen (üniform) korozyonun hayatımızın her anında karşımıza çıkması olağandır. Metallerde en sık rastlanan korozyon tipidir. Üniform korozyon elektrokimyasal ya da kimyasal tepkimelerle ortaya çıkar. Korozyonu gerçekleştiren bu tepkimeler metalin her tarafında eksiksiz gerçekleşir tüm yüzeyler korozyona uğrar. Homojen korozyon metallerin her kısmında eşit azalmalarla gerçekleşir ve aynı hızla tepkimeler oluşur. Normal şartlar altında gerçekleşmesi beklenen korozyon olayı



homojen korozyondur. Malzeme et kalınlığının eŒit oranlarda azaldığı görülür (Œekil 2.27).



**Œekil 2.27** Her noktada aynı miktarda gerekleŒen homojen korozyon olayı

Korozyon olayının bu tipine atmosfer ortamında redükleyici asitlerde ve korozif etkiye sahip sıvı zeltelerde rastlarız. Korozyon hızını tahmin etmek diğer korozyon türlerinde tahmin etmek pek mümkün olmasa da korozyon olayının bu türünde üniform Œekilde azalmalar devam ettiği iin korozyonun hızını tahmin etmek zor olmayacaktır. Korozyonun gerekleŒtiđi sırada metalin en fazla yok olduğu korozyon türü homojen korozyon türüdür. Diğer korozyon tiplerinde metal kaybı kısıtlı ve kısmen bazı bölgelerde görüldüğü iin kayıp oranları kıyaslandığıında homojen korozyonun yanına yaklaŒması imkânsız düzeydedir. Günümüzün en büyük sorunlarından biri olup hi gerekleŒmesi istenmeyen bir durum haline gelmiŒtir.





Şekil 2.28 Homojen dağılımlı korozyona uğramış boru parçası



Şekil 2.29 Homojen korozyon sonucu kopan doğalgaz boruları örnekleri

### 2.2.9.1. Homojen korozyonun önlenmesi

Homojen yayımlı korozyona engel olabilmek için basit önlemlerde alınabilir bu tarz önlemleri şu şekilde sıralayabiliriz:

Uygulamalarda kullanılacak maddelerin korozif ortamlarla olan temasını engelleyebilmek amaçlı olarak yüzeylerine uygun kaplama yöntemleri uygulanabilir

Korozif ortama ekleyeceğimiz inhibitörler yardımı ile korozyonun tüm yüzeyi ele geçirmesine engel olabilir.

Katodik koruma kullanarak maddeyi koruma yoluna gidilebilir masrafı yüksek olan bir korozyon türü olsa da ilerde karşılaşılabileceğimiz olumsuz sonuçlar için alınan en kesin yöntemdir diyebiliriz ilerleyen aşamalarda katodik korumanın faydalarını ve yararlarını ele alacağımız detaylı bilgiler yer alacaktır.

### 2.2.9.2. Üniform korozyon hızı

Bu tip korozyonun hızını basit bir araştırma ortamında basit deneyler ile bularak malzemenin faydalı kullanım ömrünü çok yakın sonuçlar alarak bulunabilmek mümkündür. Örneklendirecek olursak sıvı halde sülfirik asit içine batık halde tutulan herhangi bir maddenin korozyona uğrama durumu bu şekilde gerçekleşir.

Bu korozyon tipi, korozyonun hızıyla saptanır, bir yıl içerisinde gerçekleşen kayıp 1 mil = 0,001 inç = 0,0254 mm şeklinde ifade edilebilir. Korozyon hızlarına göre metal yapıların jeotermal sistemde kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

Korozyon gerçekleşme hızı 0,15 mm/yıl (5,9 mpy) değerinden küçük ise bu grupta yer alan metallerin korozyona karşı gösterdikleri direnç fazladır ve önem arz eden parçalarda kullanılması uygun olur. Örnek verecek olursak, vanalar, pompa şaftları ve kanatçıkları.

Korozyon gerçekleşme hızı  $0,15 \text{ mm/yıl} < \text{hız} < 1,5 \text{ mm/yıl}$  (5,9 – 59 mpy) şeklinde ise bu metaller korozif etkisini hızla gösteren yerlerde kullanılmaktadır. Örneğin; tanklar, borular, vana gövdeleri vb.

Korozyon gerçekleşme hızı 1,5 mm/yıl (59 mpy) değerinden büyük ise, bu değerdeki metalleri sistemde kullanılması uygunsuzdur.

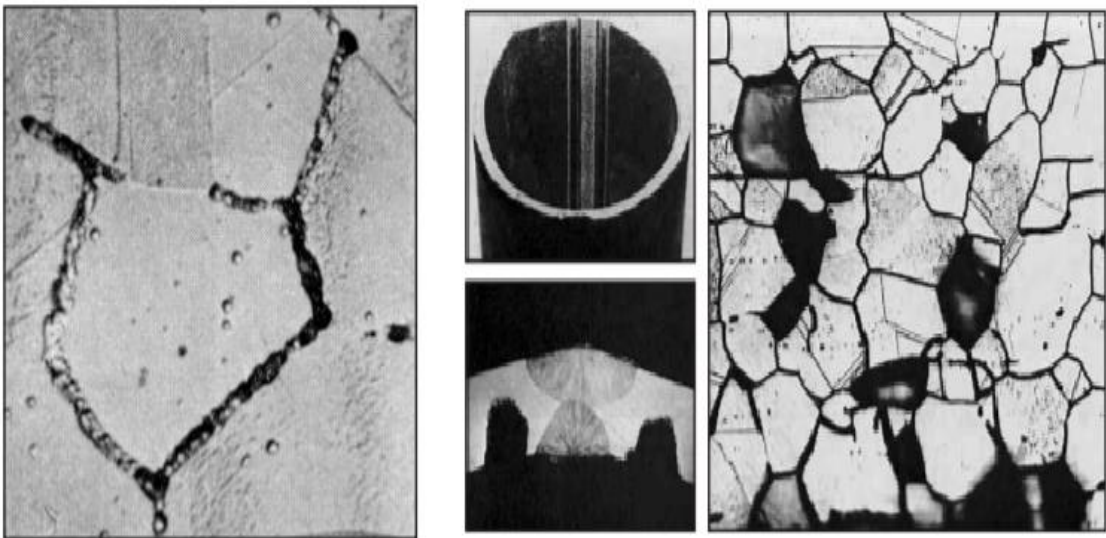
Boru içerisinde geçen jeotermal akışkanın karakteristik özellikleri korozyon hızını etkileyen bir durumdur, akışkanın içerisinde bulunan erimiş gazlar en önemlisidir. Oksijen düşük alaşımlı çelikler ve karbon için en tehlikeli korozif özellikler taşıyan elementtir. 30 ppb (parts per billion) oranı karbon çeliğinin korozyona uğrama hızını dört katına kadar yukarı çeker. Yalnızca oksijen değil, karbondioksit ve hidrojen sülfür ve diğer erimiş gaz ve katı metalik yapıların korozyona uğrama hızlarını arttırıcı şekilde etkiler. Erimiş haldeki karbondioksit gazı ortamın pH değerini düşürür, karbon ve HSLA çeliklerinin korozyon hızlarını yükseltir (Aygün, 2003).

### 2.2.10. Taneler arası gerçekleşen korozyon

Ergitilen metal müdahale olmadan soğumaya bırakıldığı durumlarda yapışık kristal şeklinde katılaşır. Kristallerden meydana gelen taneler sınır çizgileri birbirlerinden ayrılır. Taneler arasında dar olan kısımlarda atomik yapılar düzensiz şekildedirler. Metalden üretilen maddelerin korozyona en yatkın olduğu kısımlar dar olan atomik yapının düzensiz olduğu bu kısımlardır.

Taneler arası gelişen bu korozyon tipi, taneler arasında meydana gelen pislikten ya da yabancı herhangi bir maddeden yani kısacası saf olmayan bir etkiden dolayı gerçekleşir. Al elementi içerisine karıştırılan çok az oranda Fe elementi taneler arası korozyona sebep verir. Al metali içerisinde çözünemeyen Fe elementi taneler arasında toplu şekilde bulunurlar. Bu duruma benzer şekilde paslanmaz çelikte de taneler arasında oluşan sınır çizgilerinin bulunduğu bölgelerde krom atomlarının sayısının azlığında dolayı taneler arası korozyona fazla dayanıklı değildir.

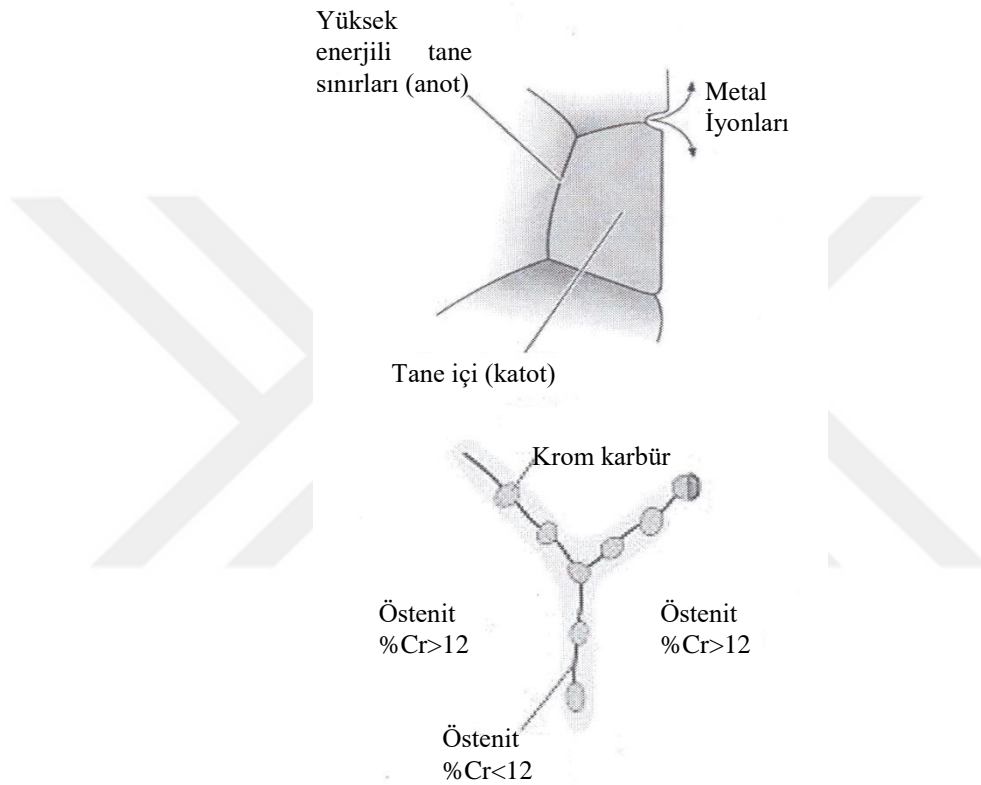
Taneler arası meydana gelen korozyona uğraması bakımından 18-8 paslanmaz çelikleri özel durumlar gösterir. Normal şartlarda bahsedilen bu paslanmaz çelik türü korozyona karşı direnci en yüksek malzeme olmasına rağmen, 500 ile 800°C'ye kadar ısıya maruz kaldığı durumlarda korozyona uğrama durumu oluşur. Korozyon kendini 650 derece civarında yaklaşık bir saat durdurulduğunda taneler arasında krom oranı azaldığından en şiddetli şekilde belli eder. Paslanmaz çeliklerin içerisinde yüzde 12 düzeyinde krom atomlarının ihtiva edilmesi gerekmektedir. Fakat bu sıcaklıklarda ısıtılacak olursa paslanmaz çelik içinde bulunan krom karbon elementi ile tepkimeye geçerek krom karbür ( $Cr_{23}C_6$ ) bileşikleri meydana gelir. Bu bileşik paslanmaz çeliklerin içinde çözünmez ve taneler arasındaki sınır bölgesinde birikinti oluşturur. Bu durum karbon oranı % 0.02'den fazla ise oluşur. Krom karbür bu durumda korozyondan etkilenmez. Fakat krom azlığından dolayı da bu bölge de korozyona dayanıksız hal alır. 304 paslanmaz çelikleri %0.06 ile %0.08 oranlarında karbona sahiptirler ve taneler arasında fazlaca krom çökelti birikir. Biriken bu krom karbür çökeltisini aşağıdaki şekilde inceleyebiliriz.



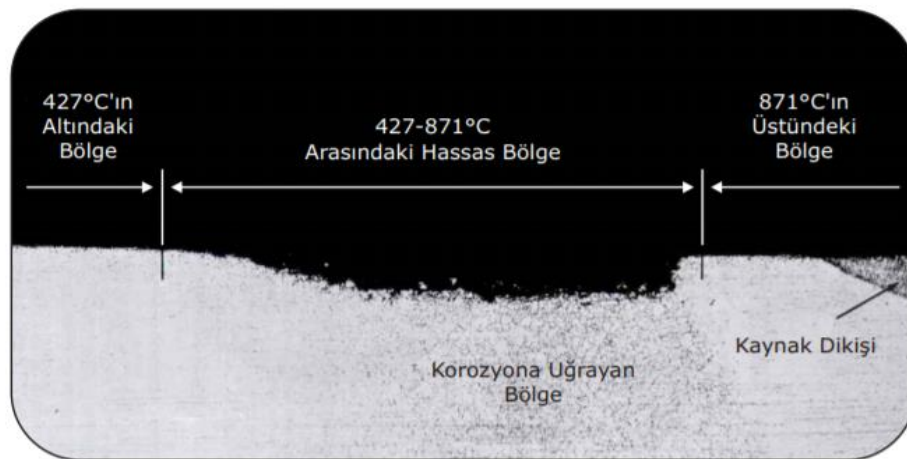
Şekil 2.30 Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökeltisi (x 1200)

### 2.2.10.1. Paslanmaz çeliklerde krom bromür oluşum süreci

Isı etkisinde bulunan kısımlar 427 ile 871°C sıcaklıklara kadar ulaşan kısımlarda yer alan tane sınırlarında çökelti oluşturan ve korozyon hızını yükselten krom bromürler meydana gelir ve burada hassas yapı oluşmasına sebep verir (Şekil 2.31 ve Şekil 2.32). Olayın meydana gelişi esnasında biraz krom çözültiden tane sınırlarına doğru akma görülür bunun sonucu olarak bu kısımlarda krom azalacağı için korozyona karşı direnç kaybolur (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Taneler arasına krom karbürlerin yerleşmesi



Şekil 2.32 Krom karbür çökmesi sonucu hassas bölgede oluşan korozyon

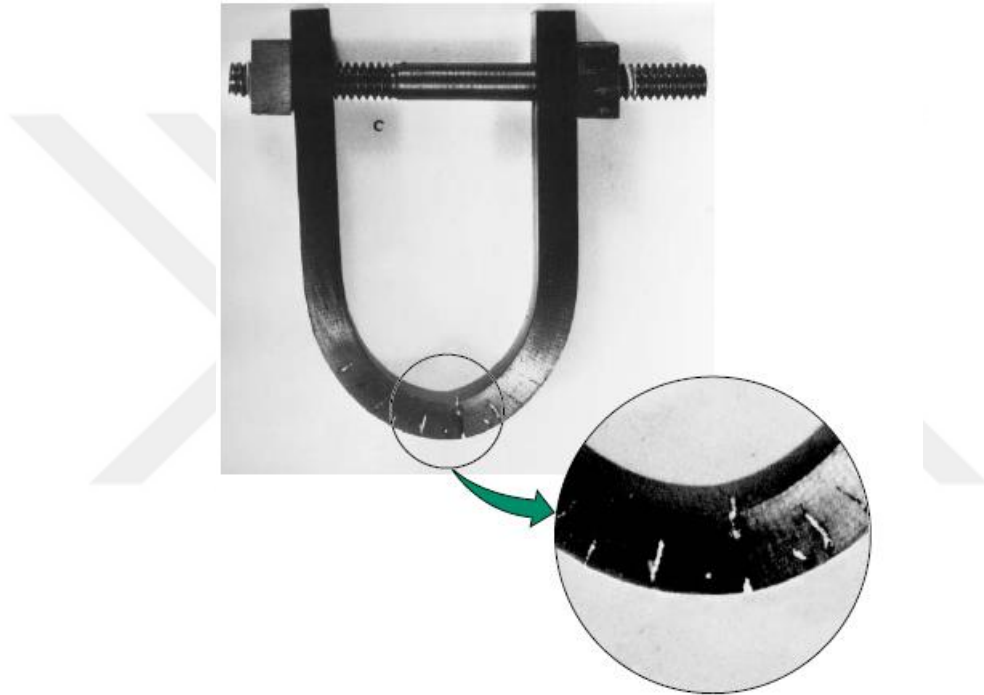
Oluşan bu durumun çözümü için krom elementi ile bileşik oluşan krom karbürün oluşmaması için karbon atomunun mekanizmada az düzeyde tutulması gerekir. Yani sistemde düşük karbonlu (L tipi) metallerim kullanılması faydalı olacaktır. Bununla beraber kaynak uygulaması sırasında öntav yapılmaması ısı girişinin düşürülmesine dikkat edildiğinde ve bakır altlık kullanarak hızlı soğutmak hassas sıcaklık aralığında az süre kalacağından son derece faydalıdır. Farklı bir yöntem de denge haline getirilmiş olan paslanmaz çeliklerin ana ve dolgu malzeme olarak kullanılmasıdır. Bu dolgu malzemeleri denge haline getirme görevini yerine getiren alaşım elementleri karbon atomuyla reaksiyona girerek krom atomlarının sayısını azaltmasını önleyerek sistemde kalmasına yardımcı olacağından korozyona karşı olan dirençte bir azalma meydana gelmeyecektir. 347 tipi paslanmaz çelikleri ise niobyum ile dengelenmişken, 321 tipi paslanmaz çelikleri dengeleyici olarak titanyum elementini bünyesinde bulundururlar. Bu elementler krom elementinden daha etkili karbür oluşturur. Bu anlatılanlardan farklı yöntemlerde bulunur fakat bu yöntemler uygulama sırasında güçlük çıkarmakta ve pahalı olmaktadır bundan dolayı tercih edilen yöntemler değildirler.

### **2.2.11. Gerilmeli korozyon**

Madde hem korozyon yapıcı ortamda hem de belli bir gerilime maruz kalıyor ise maddenin çatlayıp kırılması hızlanır. Maddenin yüzeyinde yer alan bir oyuk gerilimin etkisi ile korozyona karşı dayanıksızlaşarak korozyonun başlamasına uygun bir ortam oluşur. Korozyon altında oluşan katı eriyiklerin madde üzerinde oluşturduğu koruyan bir film tabakası oluşturduğu halde herhangi bir gerilim altında oluşmazlar ve korozyon ortamda madde korozyon çok çabuk ilerlemeye devam ederken bir müddet sonra maddenin korozyonun gerçekleştiği kısmında çatlamasına hatta kırılmasına sebep olur (Şekil 2.33).

Korozyona uğrayan metal çekme gerilimi altında son derece tehlikeli olup ani kırılmalara uğrayarak telafisi güç sonuçlar ortaya çıkartır. Korozyonun bu en tehlikeli türü gerilim ve korozyon ortamının etkisi altında kalan metale aynı anda etki etmesi sonucu oluşur. Bazı kaynaklarda ve araştırmalarda hidrojen kırılabilirliği gerilmeli korozyon olarak adlandırılmıştır. Fakat ikisinin aynı olmadığı katodik koruma uygulandığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Katodik koruma gerilmeli korozyonu önlemenin en etkili yolu iken hidrojen kırılabilirliğini önemli ölçüde arttırdığı görülür. Bu durumlar farklı iki durum olduğunu anlamış oluruz.

Gerilimin etkisini taneler arası korozyonu arttırırken çukur korozyonu da arttırır. Çekme gerilmesi etkisi altında kalan kısımda bir süre sonra çatlak oluşur. Bu olaylardaki çatlama kırılma mekaniğinin ilkeleri doğrultusunda ele alınır. Çatlama kritik gelişim periyodunun altında ise etkisizdir. Oyukların ilerleme hızı ve kırılma oluşturan kritik çatlama uzunluğunu hesaplarla tespit edilir. Çatlağın olup olmadığı kırılma gerçekleştirmeyen deneylerle yaparak belirlenebilir. Çatlakları önceden bulup önlem almak ekonomik olarak ve iş kazalarına karşı büyük önem taşır. Çatlak oluşumuna sebep veren durumların incelenip kayıt altına alınarak oluşacak kazaların önlenmesi ileriye yönelik iş kazalarının oluşmasının önüne geçecektir.



**Şekil 2.33** Bir demir çubuğun somun civata arasında korozif ortamda gerdirilerek ortaya çıkan gerilim korozyonu. Gerilimin en yoğun olduğu noktada çatlak ve kırılmalar oluşur (Laque, 1975)

Gerilmeli tip korozyon korozif ortam ve mekanik kasılmaların aynı anda madde üzerine etki etmesi sonucu birbirini izleyen olaylar silsilesidir. Bu tip korozyonun meydana gelmesinde mantık olarak akla gelen en önemli etken maddenin maruz kaldığı gerilimlerin bileşkesidir. Madde yüzeyinde ki çatlaklar kırılmaya ne büyük nedendir fakat korozyonun rolüde es geçilemez büyük ölçüde önem taşır. Korozyona ismini veren bu gerilmelerin sebebi ve nereden dolayı kaynaklandığını gözlemleyerek çözemeyiz. Bu tip korozyon korozif ortamlara ve maddenin cinsine göre değişiklik gösterir. Deneysel çalışmalar ile ortaya çıkan sonuçlara inanmak zorunda olduğumuz

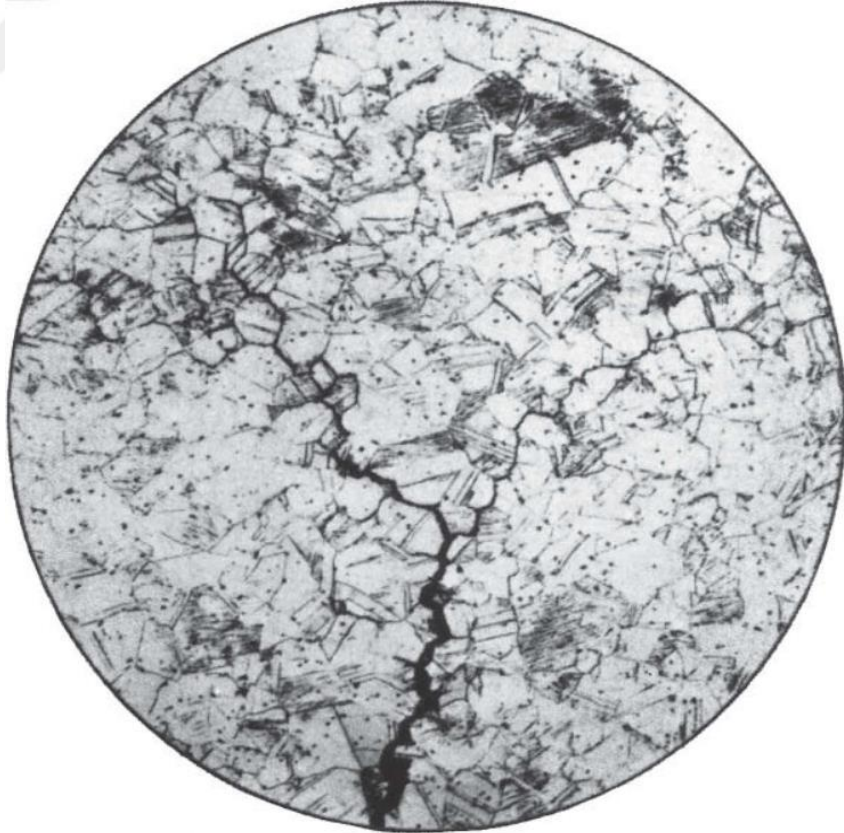


korozyonun bu türü için gözle görülebilen kesin bir bulgu ortaya konulamaz. Çekme gerilmelerine maruz kalan çeliğin mikroskobik görüntüsü Şekil 2.34'te gösterilmiştir.



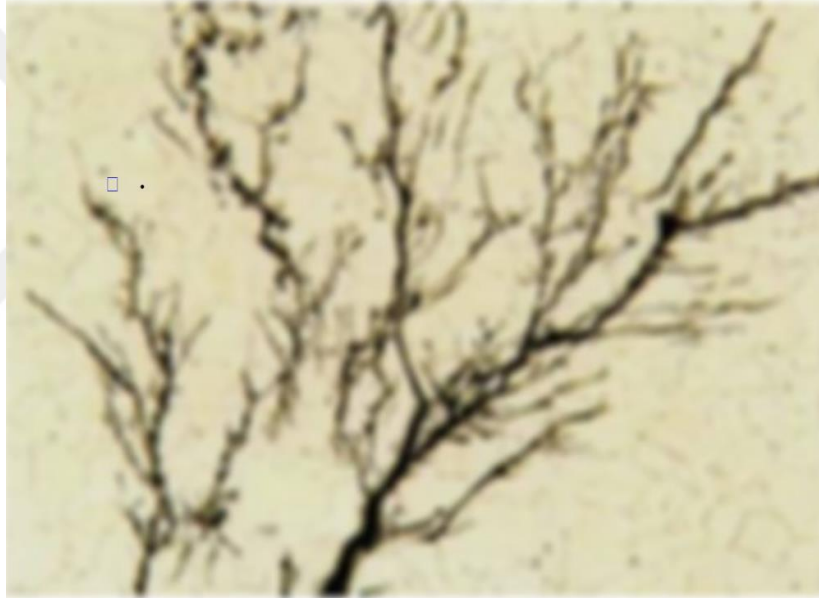
**Şekil 2.34** Çekme gerilmelerine maruz kalan çelik maddenin korozif ortamın etkisi nedeniyle gerçekleşen gerilmeli tip korozyonun mikroskobik görünümü

Bu korozyonun pirinç malzemede meydana geliş durumunda madde yüzeyde korozyona uğramamasına karşın ince çatlaklar maddenin iç kısımlarına doğru ilerlediği gözlemlenir (Şekil 2.35).



**Şekil 2.35** Pirinçte gerçekleşen taneler arası gerilme korozyon çatlakları (Revie and Uhlig, 2008)

Gerilmeli tip korozyon kostik kırılma şeklinde karşımıza çıkar (Şekil2.36). Bu kırılma çeliklerde görülürken aynı zamanda pirinç malzemelerde mevsimsel koşullar nedeniyle gerçekleşen bozulma durumunda da görülebilir. Mevsimsel koşullar nedeni ile ortaya çıkan bu kırılma, pirinçten üretilmiş fişek kartuşlarında görülür. Tropik iklime sahip alanlarda çok yağış olduğu zamanlarda pirinç fişek kartuşlarında kartuşun mermiye doğru meğillendiği kısımlarda kırılma oluşur. Amonyakta mevsimsel nedenlerle bu korozyonu tetiklediği bilinmektedir. Pirinç gevrek bir madde olduğunda dolayı çatlama özelliği de fazla olur. Bundan dolayı, pirinçten üretilen arabalar ve bazı ziraat malzemelerinin ahırlara yakın yerlerde yani amonyağı yüksek oranda bünyesinde bulunduran ortamlarda saklanırsa pirincin korozyona uğramasının önüne geçilemez. Amonyak burada korozyon için tam manasıyla olmasa bile etkili bir katolizör özelliği gösterdiği aşikârdır.



**Şekil 2.36** 316L tipi paslanmaz çelikten üretilmiş ısı değıştiricinin de klorun nedeniyle oluşan gerilmeli tip korozyonun çatlağı

Kostik kırılma olayının tanımını daha önceki paragraflarda yapılmıştı. Bunun farklı bir şekli ise kazanlarda görülen kostik kırılma türüdür. Bu tür kırılma gerilmeli tip korozyon olayının karşılaşılan farklı bir kırılma türüdür. Alkali özellikteki suların buhar kazanlarının kazan beslemesinde kullanılması koroziyonu azaltır. Kostik buharlaşması nedeniyle artan konsantrasyonu nedeniyle perçin bağlantılarının boşluklarında çatlaklar görülür. Eğer suyun alkalitesinin fosfat ile durdurulması yada uçucu bir madde olan amin bileşimleri ile düzenlenirse kostik buharlaşma sonucu artan konsantrasyon sonucu oluşan gerilmeli tip korozyonun sebep verdiği çatlakların önüne



geçilebilir. Bu bahsi geçen çözüm yöntemlerinden herhangi birinin uygulanması pH durumunun meydana gelen çatlakların içerisinde afaki derecelerde artmasının önü alınmış olur. Kazan besleme sularının bir arıtma düzeneğinden geçirilmesi oluşabilecek olan bu korozif etkilerin önüne geçebilir. Bu arıtma düzeneğinin de uygulanış biçiminin kontrol edilmesi faydalı olacaktır.

Denizin tuz oranı yüksek suyu içinde bulunan yüksek mukavemete sahip alüminyum alaşımlarında görülen korozyon tipi stres çatlak korozyonu tipidir. Gemilerin hem hafif hem de yüksek mukavemete sahip olması istenir. Bu sebepten dolayı geminin üretiminde kullanılan materyallerin çoğu oldukça yüksek mukavemet oranlarına sahip Al-Si alaşımlarıdır. Bu tarz yüksek mukavemete sahip alaşımlar gerilmeli tip korozyon olayına karşı pek dayanıksızdır. Buzlu ve soğuk sularda korozif etkilere karşı dayanımı düşük olur. Orta derecede korozyon direncine sahip alaşım metallerini kullanmak daha mantıklı olur. Deniz duyu dışında herhangi bir ortamda bulunan yüksek dirence sahip döküm alaşımları kullanılmasının korozyonun bu türü açısından sorun teşkil etmez.

Tarihte yapılan ilk buhar ile çalışan trenlerin perçin kullanılarak üretilmesi nedeniyle buhar kazanlarında birçok kez patlamaların görüldüğünü bilmekteyiz. Oluşan bu patlamaların perçin deliklerinin kırılma olduğundan dolayıdır. Perçinleme işlemi sırasında buralarda soğuk işlemler uygulanır. Burada oluşan beyazımsı atıkların laboratuvarlarda gerekli incelemelerin yapılması sonucu kostik özellik taşıdığı görülür. Bu duruma da kostik kırılma denilmektedir. Yapısal bu zedelenme sonucu gerçekleşen çatlakların oldukça ince ve çok olduğunu bilmek yararlı olacaktır.

Gerilimli tip korozyon olayına karşı metallerin gösterdiği direnç korozif ortamın özelliğine ve yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin stenitik paslanmaz çelikler amonyak içeren ortamlarda bu korozyon türünden etkilenmezler fakat klorür içeren ortamlarda gerilimli korozyon oluşur. Pirinçler ise amonyaklı ortamlarda bu tür korozyon görülmesine karşılık klorürlü ortamlarda korozyon görülmez. Gerilimli korozyon türü her malzemede ve her ortamda sık sık görülmez. Paslanmaz çelikler sülfürik nitrik, asetik asit veya saf sularda bu tip korozyon gerçekleşmez sadece klorür ve kostikli ortamlarda bu gerilimli korozyon türü karşımıza çıkar.

Bu tip korozyon üzerinde etkisi olan belli başlı durumlar şu şekilde sıralanmıştır:  
Metalin yapısal oluşumu,

Malzeme bileşimi,

Sıcaklık,

Gerilim,

Çözelti bileşimi.

Genel olarak bilinen bazı düşünceler vardır bunların basit bir örneği saf bir metalin düşünce kırılmayacağıdır. Bu saf metaller genellikle amonyaklı çözeltiler içerisinde düşünce kırıldığı gözlemlendiğinden beri bu düşünce artık geçerliliğini yitirmiş durumdadır.

### **2.2.11.1. Gerilmeli korozyonun gerçekleşme mekanizması**

Gerilimli tip korozyonun mekanizması şimdiye kadar tam olarak çözülebilmemiş bir mekanizma olmayıp oldukça karışık bir şekilde gerçekleşmektedir. Buna sebep veren durumların en başta gelenleri metalin iç yapısının da gerçekleşen olaylar ve çevrede vukuu bulan farklı korozif etkenlerdir. Gerilimli korozyona neden olan belli bir mekanizma yapısından bahsetmek oldukça güç olup ancak laboratuvar ortamlarında deneysel çalışma yaparak deneme yanılma yöntemi ile gerçekçi sonuçlar sunulabilir.

Korozyon olayı çatlakların meydana gelmesinin en başlı sebeplerinden biridir. Oluşan bu oyuklar sonucu metalin yüzeyinde düzensizlik oluşur ve yüzey üzerindeki gerilimlerin etkisini fazlalastırır. Gerilimin etkisi ile çukurlar metalin iç kısımlarına doğru ilerleyerek korozyona sebep olan korozif konsantrasyonları arttırır. İlerleyen bu çatlaklar katodik koruma ile durdurulabileceği gibi katodik koruma etkisini yitirmeye başladığı vakit ya da sistemden katodik koruma kaldırıldığında oluşan bu çatlak lifleri metalin iç yapısında laminer bir şekilde ilerlemeye devam ederek kırılmalara ve çatlamalara sebep verir. Bu korozyonun ilerleyişi ile ilgili birçok mekanizma ortaya atılmıştır. Çatlamanın ilerlemesi için gereken gerilim ve korozyonun ortak etkisi bir arada görülmektedir. İlerleyen bir çatlak katodik koruma ile durdurulmakta ve katodik koruma ortadan kaldırıldığı zaman çatlama devam etmektedir. Gerilmeli korozyonun oluşumu ile ilgili olarak değişik mekanizmalar ileri sürülmüştür.

İleri sürülen bu mekanizmalar aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir.

Çatlak oluşumu öncesi aktif alanların mekanizması,

Mekanik nedenlerle oluşan aktif alanların mekanizması,

Gerilimin kritik olduğu kısımlar da farklı atom yapılarının tutunma mekanizması.

Çatlak oluşumu öncesi aktif alanların mekanizması: Bir bölümü taneler arasındaki sınırlarda cereyan eden korozyon tipidir. Pirinç ve alüminyum gibi çeşitli alaşımlar yapıları gereği gerilmeli tip korozyona uğrarlar. Tane sınırlarında gerilimler yığılma yapar ve aşınma gerçekleşir. Bu durumda çok tehlikeli olan gerilim tip korozyona sebep verir.

Mekanik nedenlerle oluşan aktif alanların mekanizması: Korozyon sonucu maddenin yüzeyinde veya içyapısında gerçekleşen çatlakların ucunda plastik deformasyon oluşur. Çatlak ucunda ki kısımlar da korozyon sebepli oluşan anodik akımlar çatlağın ucunu pasif hale getirir. Gerçekleşen aşınma sonucu buradaki pasif film tabakası kırılır ve oyuk ucunda korozyon devam eder. Sonra tekrar pasif durum oluşur daha sonra kırılır ve aktifleşir böylelikle böyle bir döngü oluşur.

Gerilimin kritik olduğu kısımlar da farklı atom yapılarının tutunma mekanizması: Gerilimli korozyonun bu mekanizmasında da, korozif ortamda yer alan atomların bazıları, oyuğun uç kısmından maddenin kristal kafesine doğru genişler ve atomlar arasındaki bağı kopartarak mekanik direnç kaybına neden olur.

#### **2.2.11.2. Gerilmeli korozyonun önlenmesi**

Gerilim tipi korozyonla mücadele etmek için korozyon konusunda yeterli bilgilere sahip tasarım konusunda tecrübe sahibi kişilerle çalışmak gereklidir. Kullanılacak malzeme cinsi belirlenirken mekanik dayanıklılığı iyi olan malzeme seçilmelidir. Gerilim tip korozyon devreye girerse malzeme dayanım gösteremez. Genelde de ortamın koroziflik oranını bilmek mümkün olmaz. Zaten korozyonun oluşum mekanizmasını bilemediğimizden dolayı da deneme anılma yoluna giderek gerilimli korozyonu önleme yoluna gidilir.

Bu tip korozyonun malzeme üzerindeki olumsuz etkilerini minimuma indirebilmek için birçok önlem alınabilir. Bu önlemlerden bazıları vereceğiz ve bunlardan birini ya da birkaçını uygularsak gerilim korozyonunun etkisini önemli miktarlarda azaltmış olup korozyon direncine de büyük oranda destek sağlayacağız.

Malzemeye korozyon etkisi yaratan ortamdaki kritik çevre faktörleri ortamdaki uzaklaştırılarak ya da gazlı bileşenleri de ortamdaki uzaklaştırırsak bu durumu azaltabiliriz ya da kısmen etkisini giderebiliriz.

Katodik koruma en etkili yöntemler arasında yer almaktadır lakin bu tip korumada hidrojen kırılabilirliği yükseldiği için dikkatli bir şekilde yapılması münasip olacaktır. Oldukça dikkat edilmesi gerekir bu korozyon tipi için.

Isıl işlemler uygulamakta metal üzerindeki gerilmeli korozyonun etkisini azaltmada bize yardımcı olacaktır. En azından bir miktar da olsa gerilim değeri belli bir limitin altına inecektir. Gerilimin eşik değerinden düşük seviyelere getirmek ve madde içerisindeki gerilimi indirmek için tavlama işlemi uygulanır. Adi karbon çelikler yaklaşık olarak 1100-1200°F sıcaklık değerleri arasında tavlama uygulanmasıyla ve ostenitik paslanmaz çelikler ise 1500-1700°F sıcaklık değerleri arasında tavlansak malzeme üzerindeki gerilim etkisi azaltılabilir.

Gerilimli tip korozyonu daha fazla dayanıklı hale getirmek için daha dayanıklı madde kullanılması gerekmektedir. Örnek verecek olursak 304 paslanmaz çelikleri Gerilim korozyonuna oldukça dayanıksızdır. Bu madde yerine inconel alaşımı kullanırsak gerilim korozyonunun önüne geçebiliriz. Maliyet açısından ise karbon çeliği paslanmaz çeliklerden daha dayanıklıdır ve kullanılmasında bir sakınca yoktur. Deniz suyu kullanılarak kullanılan ısı değiştiricilerinde paslanmaz çelik kullanmak pek mantıklı değildir bunun yerine adi çelikler kullanılarak sistemin korozyon direnci artırılmalıdır.

İnhibitörleri kullanarak da gerilim korozyonunun önüne geçebiliriz en azından hızını azaltabiliriz. Koroziyonun derecesinin düşük olduğu ortamlarda fosfatlar kullanabiliriz ya da diğer inorganik ve inhibitörleri kullanabiliriz.

### **2.2.12. Yorulma tipi korozyon olayı**

Sürekli olarak gerilimin yüklenme-boşaltma olarak devam ettiği prosesler de dinamik gerilmelere maruz kalan madde belirli bir süre sonra dayanımını etkileyecek şekilde yorulma gerçekleşir ve yorulma nedeniyle madde küçük gerilmeler altında bile çatlar ya da kırılır. Bu durumun koroziyon bir ortamda gerçekleşir ise yorulma ve korozyon olayı maddenin yüzeyinde çatlamlar veya kırılmalar çok kısa zamanlarda kendini gösterir. Kısacası; Sürekli yön değiştiren gerilmelerin malzemedeki kırılmaya ya da çatlama neden olması sonucu yorulma gerçekleşir ve bu durumun koroziyon etkileri görülmesi durumunda yorulmalı korozyon gerçekleşir.

Yorulma etkisi ile korozyon süreci birlikte devam ederse maddenin yalnızca korozyon ya da yalnızca yorulma etkisi ile kırılması veya çatlama olayı bu iki durumun birlikte iken daha erken sürede kendini gösterir duruma gelir. Bu durum istenirse de koroziyon etkisi altında yorulmuş metal yorulmanın etkisi altındaki mekanik dayanımının azalması korozyon etkisi ile daha hızlı sürede gerçekleşerek kullanılmayacak hal alır ve kısa süre içerisinde çatlar veya kırılır. Bu yorulma tipi

korozyon olayı kendini daha çok maddenin çekme ya da basınç gerilimlerinin sürekli olarak devam edip bir döngüye girmesi sonucu gerçekleşir. Sonunda maddenin çekme dayanımı hafifler.

Sadece yorulma etkisi altında yani korozif ortam olmadan çeliklerin çekme gerilimlerine olan direnci normal mekanik direncinin yarı değerine kadar inebilir. Düşüşün en çok gerçekleştiği ortamlar tatlı su, tuzlu su ve hatta rutubetli hava etkilerinin birlikte görüldüğü durumlarda gerçekleşir. Normal standartlardaki çekme gerilmesi direnci durumu, tuzlu su altında kalan çekme gerilmesi direncinden %6 ya da %7 oranlarında daha fazladır. Kaliteli çelik gruplarında düşük alaşım türündeki çelikler yorulma tipi korozyon olayına adi karbon çeliklerinde daha düşük direnç gösterirler. Malın üretilmesi ya da sistemlerin işleyişi sırasında üretim bandındaki ya da kullanım altında çeşitli çekme ve itme gerilimlerine maruz kalan malzemede oluşan hataların çoğu sadece yorulmaya bağlı ya da yorulma ve korozyon etkisinin ikisinin bir arada görüldüğü durumlarda gerçekleşir. Fakat arızaya sadece çatlama neden olmuşsa bunun sebebi korozyon etkisinden değildir. Çünkü çatlak oluşum mekanizması yorulmadan kaynaklıdır.

Maddeler üzerindeki gerilmenin etkisi azaltılabildiği vakit ya da yok edilebildiği zaman yorulma tipi korozyonun önlenmesi sağlanabilir. Basıncın sebep olduğu gerilimleri de kaldırmak etkili olabilir. Malzemeye uygun inhibitörlerle veya madde üzerine katodik koruma uygulayarakta bu korozyona engel olunabilir. Anlatılan bu yöntemlerle yorulma tipi korozyonun önüne tamamen geçilerek gerçekleşmesi önlenemez. Yorulmalı tip korozyon çoğu bakımdan gerilmeli tip korozyonun özel bir alt versiyonu olarak sayılabilir. Fakat korozyon oluşum sürecinin önlenmesi için alınacak önlemler birbirlerinden oldukça farklıdır. Yorulma tipi bu korozyon olayını engellemenin basit bir yolu vardır aslında. Bu yöntem malzemenin maruz kaldığı gerilimin azaltılmasıdır aslında. Maddenin üzerine krom, nikel, bakır ya da çinko gibi özel gerilime karşı dayanıklı elementlerin kaplanmasıyla yorulmalı korozyon etkisi giderilebilir.

Yorulma tipi korozyon diğer bir tabirle korozif ortamda yorulmanın gerçekleşmesi olarakta tanımlanabilir. Korozyon atıkları ile dolmuş olan bir büyük alanın kırılma dolayısıyla gerçekleşmiş küçük bir alana toplanmasıyla yorulmalı tip korozyon mekanizması işler. Yorulma olayı, oluşan oyuklara korozyon atıklarının dolmasıyla yorulmalı korozyonun gerçekleşeceği kesin değildir. Maddenin yüzeyinde

oluşan pasın sebebi yorulma olayı sonucunda oluşan kırılmaların bir nedenidir büyük bir ihtimalle. Bu anlatılanları bir noktaya bağlayacak olursak yani o da şudur ki yorulma kırılmalarından dolayı ya da korozif atıkların çatlaklara dolmasından dolayı meydana gelen bu durumların sebebi maddenin kullanım ömrünü etkilemeyeceği gibi yorulmalı tip korozyonun gerçekleşmeyeceğini de bize gösterir.

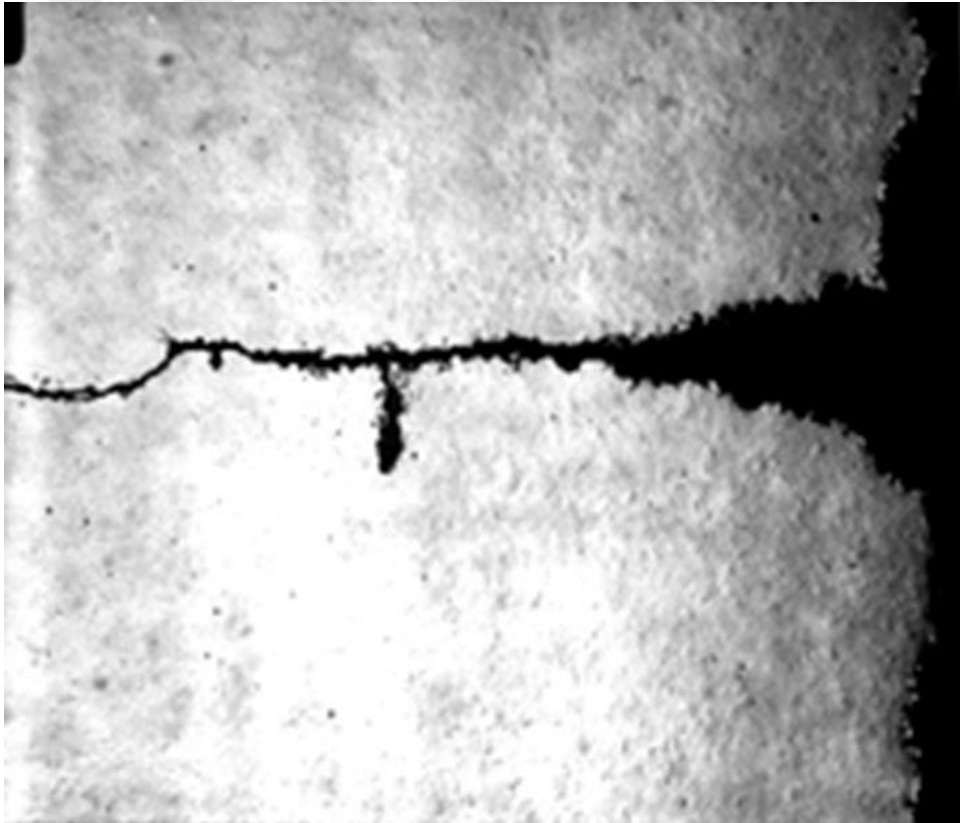
Yorulma tipi korozyon gerilme tipi korozyonun özel bir durumu olarak karşımıza çıkma ihtimali de vardır. Çevresel ortamlar yorulma tipi korozyonu yüksek oranlarda etki eder. Gerilim devir frekansı ile korozyon olma durumu doğru orantılıdır korozyonun oluşmasını gerçekleştirir. Düşük gerilim frekansları yorulmalı korozyonu arttırıcı ve hızlandırıcı etkiye daha çok sahiptirler. Düşük yorulma gerilim frekansları madde ile korozif ortamın daha fazla iletişim haline geçip korozyonun başlamasını hızlandırır. Ortamda oksijen atomlarının bulunması, sıcaklık etkeni, pH değeri ve ortam çözelti bileşenleri korozyonun bu türünü etkileyen başlıca faktörlerdendir. Örneğin çelik, paslanmaz çelikler, demirler ve alüminyum bronzlarının sıvı içerisinde ki yorulmalı korozyon dirençleri oldukça fazladır. Östenitik paslanmaz çelikleri ve alüminyum bronzları ise deniz suyu içerisinde normal yorulma dirençlerinden %70 ile %80'e kadar dirençlidirler. Yüksek krom alaşımların da ise deniz suyu içerisindeki değer %30 ile %40 arasında kalır.

Yorulmalı korozyonun mekanizması kapsamlı araştırmalarla incelenmiştir. Lakin korozyonun bu türü Korozyona uğrayan maddenin bileşenlerinin niteliksel boyutta incelenmesi ile anlaşılır duruma gelir. Yapılan yorulma testleri ve araştırmalarının sonucunda demir ve demir bazlı maddelerin yorulma ömür tablosunda oluşan eğrilerin demir dışı maddelere benzediğine rastlanmıştır. Çukur tipi korozyona sebep olan korozif ortamlar yorulmalı tip korozyona daha çok etki eder. Korozyonun sebep verdiği çukurcuklar gerilimi arttırır ve çatlakları başlatıcı bir role sahiptir ve yorulma direnci bu tarz korozif ortamlarda azalır.

Yorulma tip korozyona uğramış malzemelerin görüntüleri Şekil 2.37 ve Şekil 2.38'de verilmiştir.



Şekil 2.37 Dişlilerde oluşan yorulmalı tip korozyonun temas sonucu çatlama örneği



Şekil 2.38 Buharlı bir sistemde gerçekleşen yorulmalı korozyon

### **2.2.12.1. Yorulma tipi korozyonun önlenmesi**

Bu yorulma tip korozyon olayı için ortada belirli bir dayanım limit değeri yoktur. Fakat gerçekleşebilecek olan arızanın gerçekleşmeden önce gerilme değerini tahmin etmek mümkündür. Yorulma tipi korozyonu gerçekleşebileceği durumlarda ortam koşulları değiştirilerek veya korozyona direnci daha yüksek malzemeler kullanılması gerekir. Bir başka önlemler dizisi olarak katodik koruma ve inhibitörler kullanılabilir. Tasarım aşamasında da önlem almak mantıklı olacaktır.

Yorulma tipi korozyonu önlemenin çok yolu vardır.

Yorulma direncini arttırmak için maddenin gerilmelere karşı direncini arttırmak.

Maddenin maruz kaldığı gerilmeleri düşürmek yorulma tipi korozyonu durdurabilir.

Gerilmeleri azaltacak şekilde uygun tasarımların yapılması yorulma korozyonunun önüne geçilmesini sağlar.

Malzemeye uygun ısı işlemlerin sağlıklı bir şekilde uygulanması bu korozyon türünün önüne geçebilir.

Malzemeye uygun inhibitörler kullanmak.

Yorulmalı korozyona karşı olan direnci çinko, krom, nikel, bakır elementlerinden elde edilmiş kaplamalar yükseltir. Kaplamada gerilme meydana getirmeyecek şekilde kaplamanın yüzeye uygulanması gerekmektedir. Organik kaplama maddeleri de kullanmak direnci arttıracaktır. Bu organik maddelere örnek verecek olursak bunlar: sentetik elastomer fenolik-epoksi-silikon, naylon ve epoksi-polistren gibi maddelerdir.

### **2.2.13. Hidrojenin sebep verdiği bozulma**

Malzemenin karşılaştığı mekanik zarar ortamda bulunan hidrojenden kaynaklı ise buna hidrojen bozunması denir.

Bu bozulmayı 4 bölümde inceleyebiliriz.

Hidrojen boşluklarının oluşumu,

Hidrojenin kırılganlığı (gevrekliği),

Dekarbürizasyon,

Hidrojenin korozyona uğratması.

Hidrojen boşluklarının oluşması hidrojen atomlarının maddenin yüzeyine teması sonucu oluşur. Hidrojen kırılganlığından bahsetmemiz için ise de hidrojen atomlarının



metal malzemenin yüzeyine teması ile gerçekleşir bu durumun sonucu olarak ise metalin gerilme dayanımı ve elastikiyeti kaybolur. Dekarbürizasyon sonucu oluşan karbon atomlarının ortamdan uzaklaşması yüksek sıcaklıklara ulaşan ortamın sonucunda hidrojen atomları dolayısıyla gerçekleşen bir durumdur. Oluşan bu durum sonucunda maddenin gerilmelere olan dayanımı azalmış olur. Hidrojen tipi korozyonun meydana gelebilmesi için ise ortamda bulunan hidrojen atomlarının malzemeyi oluşturan bileşenlerden biri ile yüksek sıcaklıkta tepkimeye girmesi gerekir. Oksijeni bünyesinde bulunduran bakırın herhangi bir hidrojen atomu ile temas ederek oluşan bozulma hidrojen korozyonuna güzel bir örnektir. Petrol sektöründe hidrojen boşluklarının oluşması veya kırılabilirliğin gerçekleşmesi, pikling ve kaynak prosesi sırasında yüksek sıcaklıklarda dekarbürizasyon ve hidrojen tipi korozyonu olarak karşımıza çıkar. Gerçekleşen iki tip etkide mekanik aşınmalara sebep verir engel olamaz ise geri dönüşü olmayan kazalara yol açar.

Malzeme içerisinde oldukça küçük hatta hiç dikkate alınamayacak bir değerde dahi hidrojen atomu barındırırsa malzeme üzerine herhangi bir uygulanan gerilim sonucu hidrojen kırılabilirliği dediğimiz hassas bir durum gerçekleşir. Maddenin gerilme karşı dayanımı ve sünekliği ortadan kaybolur. Hidrojenin kırılabilirliği ara yüzeylerde ya da yüzeyde veya bu yüzeylere yakın kısımlarda oyuklanma ile ilerler ve tane sınırları boyunca gelişimini gerçekleştirir. Martenzitik çelik tipleri oldukça yüksek mukavemetleri dolayısıyla hidrojen kırılabilirliğine hızlıca uğraması muhtemel malzemelerdendir.

Hidrojen atomlarının sebep verdiği çeliklerde gerçekleşen kırılabilirlik, pullanma, çizgi şeklinde, kabarcık oluşumu şeklinde ve kırılma şeklinde birçok durumla kendini gösterir. Pullanma denilen olay, çeliğin dövülmesi sırasında dövülme yönüne paralel olarak malzemenin iç kısımlarında oluşan çatlamlardır. Gerçekleşen bu çatlaklar ultrasonik muayene cihazları ya da arızalı malzemenin enine alınan kesitinin metalografik olarak irdelenmesi ile tespit edilebilir. Kırılan yüzeyin üzerinde oluşan bu pullanmalar parlak olarak göze çarpar. Çizgi şeklinde oluşan hidrojen kırılabilirlikleri, gerçekleşen iç gerilmeler ve hidrojen atomunun etkisi ile gerçekleşen çatlak oluşumudur ve yüzeyde balık gözleri olarak bilinen karakteristik yapıdaki görüntülere sahiptirler.

Sünek özelliği gösteren maddeler içerisinde hapsolan hidrojen atomlarının sebep olduğu basınç kabarcıkların oluşmasını sağlar. Herhangi bir korozyon oluşumu tepkimesi ya da katodik koruma sisteminin kullanılması sırasında malzemede hidrojen

atomları oluşumu görülür. Bu oluşan atomlar malzemenin yüzeyinde hapsedilir. Oluşan bu hidrojen atomlarının bir kısmı birleşerek hidrojen molekülleri olarak yoluna atmosferde devam ederken diğer hidrojen atomları ise maddenin içerisine katılarak malzemenin yapısında bulunan boşluk alanları doldurur. Malzemenin içerisinde ki yer alan bu boşluklara yerleşen hidrojen atomları zaman içerisinde birbirleri ile etkileşim sonucu birleşerek hidrojen moleküllerini malzemenin yapısı içerisinde oluşturur ve hacimsel olarak bir artma durumu yaratır. Bu hidrojen moleküllerinin difüzyon özellikleri artık kalmamış duruma gelmiştir. Yüksek basınç gerçekleştiren bu hidrojen molekülleri malzemenin içerisinde boşluklarda çatlamalara sebebiyet verir. Nemli, rutubetli ortamlar yüksek sıcaklıklarda korozyon oluşumu, elektroliz ve atomik hidrojenin oluşmasını gerçekleştirir. Hidrojenin iyonlarına ayrılması sonucu hidrojen atomları oluşur. Bu durumdan hemen sonra hidrojen atomları birleşerek molekülleri oluşturur. Katodik koruma uygulaması ile elektroplating, korozyon ve diğer ısı işlemler hidrojen oluşmasını sağlayan en önemli araçlardır. Kısacası hidrojen elementi anlatılanlar ışığında korozyon oluşumu açısından oldukça tehlikelidir. Çeşitli çatlamalara ve kırılmalara sebebiyet verir malzemeyi içten içe çürütür.

Metal malzemelerin üretim aşamasında döküm aşamasında sıvı halde bulunan metallerin ortamda bulunan su buharları ile teması sonucu metalin içerisine hidrojen nüfus etmiş olur. Bu su buharı işletme ortamına hurdalardan oluşan cürüflardan ya da kullanılan refrakter maddelerden giriş yapabilir.

Malzemenin bünyesine girebilmesi için hidrojen atomlarının aşağıdaki yollardan geçmesi gerekmektedir.

- Malzemenin korozyona uğraması sonucu açığa çıkan hidrojen,
- Sisteme ya da malzemeye uygulanan katodik koruma sonucu ortaya çıkan hidrojen atomları malzeme içine nüfus edebilir.
- Malzemenin yüzeyini temizleme işleminin yani pickling işleminin düzgün bir biçimde yapılmaması esnasında asit dağlanması gerçekleşen malzemeye hidrojen girişi kolay bir şekilde gerçekleşir.
- Kaplama türlerinden olan elektrolitik kaplama türünde yapılan kaplama prosesi esnasında malzemenin yüzeyinde gerçekleşen yanma tepkimeleri sonucu ortaya çıkan hidrojen atomları maddemizin içeriğine katılabilir.

- Islak elektrotlarla gerçekleştirilen kaynak sürecin sırasında elektrotlardaki nem kaynak dolayısı ile ergimiş olan bölgeden malzeme içine ortamda bulunan hidrojen atomları giriş yapar.
- Haddeleme işlemi sırasında haddelemenin yapıldığı haddehanedeki atmosfer epey nemli ya da rutubetli ise çeliğin haddeleme işlemi süresinde ortamda beliren hidrojen atomları problemlere yol açabilir. Fakat bu durum kalıcı olmayıp kısa zamanda gaz formuna gelerek metalden ayrılır.
- Gerilimlerin metal üzerinde etkisi yüksek olduğu her ortamda hidrojen atomları bulunduğu takdirde metal üzerinde hidrojen kırılganlığı gerçekleşebilir.
- Taşıma işletme ya da sistemin yürütülmesi sırasında hidrojene sahip ortam etkisinde kalan madde bünyesine hidrojen atomlarını alabilir.

H.M.K. ve sıkı paket hekzagonal kristal kafes yapısı sistemine sahip maddelerde hidrojen kırılganlığı durumuna oldukça sık rastlarız. Demir elementi kübik merkezli kristal yapıya sahip olan metallere dendir. Hidrojen atomları bu kristal yapı içerisine çeşitli sorunlar getirebilir. Çeliklerin içine Hidrojeninin katılması maddenin kırılganlığını yükseltmeye neden olur. Demir malzemenin bünyesine kendini atmış olan hidrojen atomları diğerleri kadar hızlı bir etkiye neden olmaz fakat belli bir süre sonra fazla zaman geçmeden kırılmanın oluşmasını sağlar. Oluşan bu olayı laboratuvarlar da çekme gerilim deneyi sırasında cihaz yardımı ile net bir şekilde görebiliriz. Bu çekme deneyine tabii tutulan malzeme normal çekme gerilim değerini bir miktar geçmiş olmasına rağmen kırılma gözükmez. Fakat belli bir saat geçtikten sonra ancak kırılma meydana gelir. Hidrojen atomları metalin içine girse de kolay kolay difüze olmaz belirli bir süre geçmesi gerekir bu durumun açıklaması da budur.

Hidrojen kırılganlığı Y.M.K. kristal yapıları maddelerde etkin şekilde karşımıza çıkmaz yani bu tür kırılganlığa karşı dirençlidir. Diğer korozyon hasarlarından farklı olarak aşınma hızı ve sıcaklığa bağımlılık gösteren hidrojen kırılganlığı aşınma hızı düştükçe kırılganlık direnci azalır. Fakat ne kadar sıcaklığa bağımlı olsa da sıcaklık değişimlerinin kırılganlığa etkisi göz ardı edilebilir. Hidrojen kırılganlığına karşı olan direnci belirlemek için maddeye yavaş eğme deneyi uygulanır. Eğer darbe deneyi yapılırsa bu durum bize hidrojen kırılganlığını değerlerini vermez.

Malzemenin üzerine çeşitli kuvvetler uygulanarak deneyler yapılır, bu deneyi yaparken hidrojen kırılganlığının neden olduğu çatlama ve kırılma süreleri ölçülür. Malzeme üzerine uygulanan kuvvette hidrojen kırılganlığının gelişim sürecini belirler.

Bu kuvvete bağılı olarak belli bir zaman alıyorsa kırılma olayı buna gecikmeli kırılma denir. Yapılan bu yorulma deneyi sonucunda sistemde görülen eğri S-N (gerilme - çevrim sayısı) eğrisine yakın özellik gösterdiğinden dolayı hidrojen kırılma hızına statik yorulma ismi de verilmektedir.

Kaynak işlemi sırasında kullanılan elektrotlar ıslak ya da nemli ise hidrojen atomları oluşur.



Gelişen bu tepkimeyle oluşan hidrojen atomları malzemenin  $\alpha$ -demir içine çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama hidrojen geçişi gerçekleşir. Malzeme herhangi bir gerilime maruz kalmıyorsa kaynak sırasında malzeme yapısına giren hidrojen atomları malzemeye etkide bulunmadan malzemenin yapısından ayrılırlar. 2 gün içerisinde sıcaklığın normal olduğu durumlarda hidrojen atomları malzeme yapısında etkisini yitirir. Bazı hidrojen atomları maddenin yapısında kalıcı hale gelirler. Gerekli ısı işlemlerinin uygulanma durumunda bu kalıcı hidrojen atomları da maddenin yapısından ayrılırlar. Oluşabilecek arızalar çekme kuvveti altındayken 700 Megapascal değeri aşıldığı zaman hidrojen hasarı gerçekleşir. Dayanımı düşük maddelerin yapısında anlatılan bu durum gerçekleşmez. Yapılan çoğu araştırmalarda araştırmacılar demir içine hidrojen atomlarının difüzyona uğramasının nedeninin demir elementinin kafes yapısından dolayı gerçekleştiğini savunurlar. Oysaki bunun nedeni mikro boşluklar, dislokasyon ve tane sınırı bölgeleridir. Malzemede daha yüksek enerji sahibi olan bölgeler düşük sıcaklıklarda tutulmalıdır.

Hidrojen sebepli arızanın teşhisi çok zor olup çatlama olayının meydana gelmesi uzun zamanlar alabilir. Özellikle uçaklarda bu hidrojen kırılma hızı gerçekleşebilir. Yüksek irtifa ve ortamdaki ani ısı değişiklikleri aynı zamanda havadaki nemden dolayı kırılma hızı gözlenir. Yazılan teknik şartname ve bilgili kişiler ışığında kuralların tam olarak uygulanması halinde malzemelerin aşınmasına engel olunabilir.

Kırılma hızına neden olan hidrojen atomlarını azaltmak için alınabilecek önlemler;

- Mekanik özellikler değişime uğramadan 100 ile 150°C aralığında maddeye ısıtma uygulanarak maddenin içinden hidrojen atomları uzaklaştırılır.
- Materyal seçiminde yapısında aralık bulunmayan maddeler seçilmelidir.
- Hidrojen geçirgenliğine engel olabilecek inorganik ve organik kaplama uygulaması yapmak işe yarayacaktır. Ostenitik paslanmaz çelik ya da nikel ile

metali kaplanma işleminin yapılma amacı budur. Aynı zamanda plastik ya da lastik kaplama yapmakta faydalı olabilir.

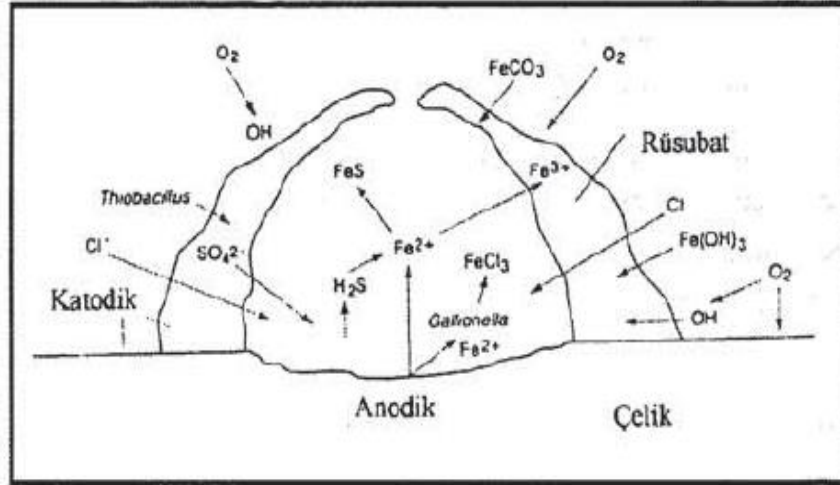
- Yüksek mukavemete sahip metallerde hidrojen kırılabilirliği eğilimi fazladır. Ni ya da Mo ilavesi yapılan çeliklerin hidrojen kırılabilirliğine karşı direnci yükseltilebilir.
- Hidrojen iyonlarının indirgenmesini sülfür iyonları, fosfor ve arsenik bileşikleri gibi bazı maddeler yavaşlatırlar. Hidrojen atomlarının molekül haline geçmesini yavaşlatırlar. Ortamda bu bahsedilen maddeler varsa malzemenin yüzeyinde hidrojen atomu yüksek olur hidrojenler molekül hale kolay kolay geçemezler.
- Islak elektrotlarla kaynak işlemi gerçekleştirilmemelidir, katodik korumayı yüksek voltajlarda yapmamak gerekir. Yani şu demek oluyor kuralımız metal yüzeyinde hidrojen atomlarının çıkışını önleyip molekül haline gelmesine meydan verilmeyip kırılabilirliği engellemektir.
- Yapılan bazı araştırmalara göre inconel 600 tipi alaşımların içine C, P, Sn ve Pb elementleri katıldığı zaman hidrojen kırılabilirliğinin önüne geçildiği görülmüştür.
- Hidrojen tepkimelerini ve korozyon hızını azalttığından dolayı inhibitör kullanmak boşluk oluşumuna engel olabilir. Genellikle kapalı sistemlerde kullanılması tercih edilir.
- Arsenik, sülfür, siyanür ve fosfor gibi zehirli atomlar içeren malzemelerin uzaklaştırılması gerekir. Bu maddeler petrol işletmesi sırasında çok sık ortamda bulunur. Bu sebepten dolayı petrol işlemesi sırasında sıkıntılar çıkarırlar. Hidrojen kırılabilirliği malzemenin içerisine hidrojen atomlarının girip molekül olarak tepkimeye girmesiyle gerçekleşiyorsa da bunun önlenmesi yukarıda anlatılan teknikler bir noktaya kadar işe yarar. Örneğin boşluksuz yapıdaki çeliklerin yani temiz çelik diye tabir edilen malzemelerin kullanımını da kırılabilirliği pek etkilemez bu zehirli maddeler ortamda bulunduğu zaman.
- Korozyon hızını düşürmek: Genelde pikling işlemi hidrojen kırılabilirliğini görülür. Bunun sebebi asitle bir temizleme işlemi gerçekleştiği için metal yüzeyinde şiddetli bir şekilde hidrojen çıkışı gerçekleşmesidir. Uygun inhibitörler kullanılarak korozyon hızı da hidrojen kırılabilirliği da azaltılır.
- Kaplama işlemleri gerçekleştirilirken ortam şartlarını değiştirmek: Hidrojenin malzemedan boşaltılmasına mani olan kaplama malzeme içinde hidrojen kırılabilirliğine neden olur.

- Maddenin yüzeyine basma yükü yönünde gerilmeler oluşturulursa kırılma önlenir.

#### 2.2.14. Mikrobiyolojik korozyon türü

Bazı mikrobiyolojik yapıda hareketli iyonların korozyon tepkime hızını yükselterek kendini gösteren korozyon tipine mikrobiyolojik korozyon denir. Bu korozyon türü diğer korozyon olaylarından farklı bir şekilde gerçekleşmeyip tepkime hızıyla alakalıdır. Genellikle malzemenin tabanında gerçekleşen bu korozyon türü büyük çukurlar oluştururlar. Detaylı bir şekilde incelendiği zaman bir organizmanın büyüüp gelişmesine benzer özellik gösterir. En çok soğutma suyu sistemlerinin genellikle durgun hareketsiz olan kısımlarında mikrobiyolojik korozyon olayına rastlanır. Bunun nedeni ise hareketsiz sularda mikroorganizmalar türer ve korozyon olayı vukuu bulur. Bunu önlemek için belli aralıklarla klorlama işlemi yapılarak, pH derecesi değişimi yapılarak, ya da organo-metalik kalay birleşikleri sisteme katılarak oluşan bu mikroorganizmaların yok edilmesi gerekir. Bu önlemler ne kadar alınırsa alınsın bu bileşiklere karşı oluşan bu mikroorganizmalar bağışıklık kazanırlar ve önlemler başarısız olur. En etkili çözüm yollarında birisi mikro organizmalar yaşamlarını devam ettirecek olan elementlerin tespit edilip yaşam kaynaklarının ortadan kaldırmak olacaktır. Çinko ve vanadyum elementleri bu elementlerin başlıcalarıdır.

Mikroorganizmaların büyümesi esnasında sülfür ya da çeşitli asitlerin oluşumu gerçekleşir. Mikroplar ise direkt olarak elektrokimyasal tepkimeye girer. Çoğu mikropların yarattığı etkileşimler sırasında kükürt meydana gelir. Çeşitli bakteriler de hidrojen sülfürü kükürt ya da sülfat oluşumuna kadar oksitler. Diğer bazı bakteri türleri ise bu tepkimelerin tam tersinin oluşumunu sağlar, thiobacillus thio oxidans türü bakteriler sülfür bileşiklerini sülfata çevirirler. Ortamda bulunan bakterilerin etkileşime girebilmeleri için oksijen olması gerekir. Desulfo-vibrio türü bakteriler ise sülfat redükler sadece anaerobik ortamlarda yaşamlarını sürdürürler. Bu cins bakteriler hidrojen sülfür üretimi gerçekleştirir. Korozif etkilerin fazla görülmediği yani korozyon olayının gerçekleşmediği durumlarda nadir de olsa mikrobiyolojik korozyon türü gerçekleşir. Herhangi bir korozyon türünün gerçekleştiği durumlarda da mikrobiyolojik korozyon türü sayesinde korozyonun hızı ve etki alanı artmış olur. Aşağıdaki şekillerde mikrobiyolojik korozyona uğramış malzemelerin mikroskopik görüntüleri karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.39).



Şekil 2.39 Mikrobiyolojik korozyon olayının gelişim mekanizması (Yalçın ve Koç, 1997)

### 2.3. Korozyondan Korunma Yöntemleri

Malzemelerin bulunduğu çevrenin doğa şartlarına müdahale edip değiştirmek imkânsızdır. Çevre şartları değiştirilemediği için korozyonu geciktirici ya da korozyonu engelleyici önlemler almak gerekir. En başta korozif çevreye dayanıklı malzeme seçimi yapmak ve çevreye göre bir tasarım geliştirmek gereklidir. Bunlar yapıldıktan sonra herhangi bir kaplama yöntemi ya da kimyasal, elektrokimyasal koruma yöntemleri ile malzemenin korozyondan korunması sağlanmalıdır.

#### 2.3.1. Uygun malzeme kullanımı

Kullanılan en yaygın yol olup korozif ortama göre daha dayanıklı mallar kullanmalıdır. Bu yolu seçersek eğer uyulması gereken bazı zorunluluklar vardır bu zorunluluklar (Gülensoy, 2006);

- Yükseltgen olmayan indirgeyici ortamlarda nikel bakır alaşımı kullanılmalıdır. Bu ortamlara örnek verecek olursak asitler ve sulu çözeltilerdir.
- Oksitleyici etkisi bulunan ortamlarda bünyesinde krom elementi bulunduran alaşımlar kullanmak gerekir.
- Oksitleyici etkisi yüksek olan ortamlarda ise titanyum ve alaşımlarını kullanılmalıdır.

Korozyondan korumak için alaşım oluşturmak maliyetli bir iştir. Alaşım oluşturmak malzemenin yapısını değiştireceğinden korozyona karşı direnci arttırıcı özelliği sağlar. Alaşımı oluşturacak elemanların maddenin tüm yüzeyine yayılması tam bir koruma etkisi yapacaktır. Bu yayılımı gerçekleştirmek için çok miktarda alaşım

elamanlarına ihtiyacımız olacaktır ve maliyeti yükselten asıl sebepte bu alaşım elemanlarının fazlalığı olacaktır. Paslanmaz çeliklerin dayanıklı olmasının sebebi özel olarak alaşımlamanın çeliğin her noktasına eşit olarak dağılımını sağlanması dolayısıyla olur ve bu malzeme pahalı bir malzemedir bu yüzden. Alaşımı sağlayan element krom elementidir. Aslında adı paslanmaz çelik olsa da paslanmaz değildir ve korozyona en dirençli malzemede olmamaktadır. Orta dereceli oksitleyici korozif ortamlarda genellikle paslanmaz çelikler kullanılır. Bu ortamlara nitrik asit çözelti ortamlar örnek verilebilir. Klorür içeren çözeltiler içinde gerilme korozyonuna karşı genel yapı çeliklerinden daha dirençsizdir paslanmaz çelikler. Paslanmaz çelikleri bu tür kullanımına uygun olmayan ortamlarda kullanmamaya büyük önem verilmesi gerekir aksi takdirde büyük sorunlara sebebiyet verebilir (Gülensoy, 2006).

Alaşım oluşturma sırasında ya da elimizde alaşım seçenekleri var ise en ucuza mal edilebilecek ve korozyona karşı direnci en sağlam olan alaşımın seçilmesi gerekmektedir.

Aşağıdaki tabloda çeşitli korozif ortamlarda hangi malzemelerin kullanılacağı özetlenmiştir.

**Tablo 2.3** Farklı tip korozifliğe sahip ortamlarda kullanılacak bazı malzemeler (Gülensoy, 2006)

Malzeme	Ortam
Paslanmaz çelik	Nitrik asit
Nikel ve nikel alaşımları	Kostik
Monel	Hidroklorik asit (tuz asidi)
Kurşun	Seyreltik (sulu) sülfürik asit
Alüminyum	Lekelemeyen atmosfer (hava)
Kalay	Su (damıtık)
Çelik	Derişik sülfürik asit
Tantalum	En yüksek direnç
Titanyum	Sıcak, kuvvetli oksitleyici çözeltiler
Hastelloylar (klorimetler)	Sıcak hidroklorik asit

Malzemelerin korozyona karşı direnci, yüzeylerinin, saflaştırılması, homojenleştirilmesi ve pürüzsüzleştirilmesi gibi alınacak önlemlerle de artırılabilir.



Metalleri arılaştırılmakta farklı bir etkili yoldur. Genelleme yapılacak olursa arı metalin korozyon direnci diğer alaşım içeren metallere göre daha yüksektir. Aynı zamanda arı metaller yüksek maliyetlidirler. Yumuşak malzeme olup mukavemetli değildir.

### 2.3.2. Sistemin korozyonunleyici tasarımı

Sistemler tasarlanırken korozyona neden olabilecek durumlar dikkate alınıp ona göre sistemi tasarlamak korozyonunlemede etkili yöntemlerdendir. Korozyonu oluşumu gerekleşmedenndennlem almaktır.

Sistemi uygun dizayn etmenin bazın örnekleri aşağıda verilmiştir:

- Araçların yakıt depoları tasarım aşamasında depo içerisinde hiçbir şekilde yakıt kalmayacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Akışın hızının boru hatlarında yüksek olması dönüş kısımlarında erozyon tipi korozyona neden olduğundan dolayı akış hızını dönüş kısımlarına doğru ilerlerken kesicinlemler alınmalıdır.
- Perçin, cıvata somun bağlantıları ve buna benzer metalin metale değdiği bağlantılarda bağlantı elemanlarının etrafı ya izolasyon malzemesi ile izole edilmeli yada birbirleriyle galvanik çift oluşturmayacak metaller kullanılmalıdır. Kaynak uygulaması yapılacak maddelerde elektrot olarak galvanik çift oluşturmayacak elektrotlar kullanmak gerekir.

Bölgesel gerçekleşen korozyonunnnne geçebilmek için, tasarım venretim sırasında uyulması gereken kurallar vardır. Bu kurallar şu şekilde sıralanmıştır (Gülensoy, 2006).

- Benzern özellik göstermeyen metalik malzemelerin birbirlerine doğrudan temasınlenmelidir.
- Çatlak ve yarılmalardan kaçınılmalıdır.
- Rastgele akım oluşturan elektrik ile çalışan aletlerin rastgele akım oluşturmasınlenmelidir.
- Malzeme bağlantılarında çok sayıda perçin ya da fazla kaynak yapılmamalıdır. Perçin ile bağlantı yapılması durumunda aralık korozyonu oluşabilir. Bunun oluşmaması için perinlenecek malzemeye göre katodikn özellik gösteren perçin maddeleri kullanılması uygun olacaktır.
- Korozyona uğraması muhtemel olan bölgeler belirlenip kolay sklr takılır şekilde tasarlanmalıdır.

### **2.3.3. Koruyucu kaplama kullanımı**

Malzemenin korozyondan korunması için koruyucu kaplamalar ile kaplayarak çevre ile malzeme arasındaki bağı kesilmesini sağlayarak yalıtkan bir ortam sağlamak gerekir. En ekonomik korozyondan koruma yollarındandır. Elektriksel dirençler kaplamaların kalitesini belirler. 10000 Ohm/mm<sup>2</sup> den yüksek dirence sahip olanlar korozyondan koruma bakımından uygun kaplamalardır (İller Bankası, 2005).

#### **2.3.3.1. İnorganik kaplamalar**

İnorganik kaplamalara çeliğin etrafını daha dayanıklı hale getirmek için seramik ile yapılan kaplamalar örnek gösterilebilir. Porselen kaplaması uygulaması yaygın olarak çelik maddelere uygulanır. Porselen çeliğin yüzeyini tamamen kapsar ve çeliklerle genleşme katsayıları birbirine eşittir. İnce bir film tabakası şeklinde çeliğe nüfus eder. Bazı çelikler ise camla kaplanırlar ve temizlenmesindeki kolaylıklar ve aynı zamanda korozyona olan yüksek dayanımları sayesinde ise kimya sanayinde oldukça yaygın bir şekilde kullanım alanlarına sahiptirler (Gülensoy, 2006).

#### **2.3.3.2. Boya uygulanarak koruma**

Malzemelerin dış ortam etkileri ile temas eden yüzeyini yalıtarak su ve oksijenin malzeme yüzeyine temas etmemesi için boya uygulaması yapılır. Boyalar genelde organik maddelerden tercih edilir. Bileşiminde korozyon önleyici pigment bulunan boyalar kullanılır. Düşük maliyetleri ve pratik kullanımı sayesinde en çok tercih edilen korozyondan koruma yöntemlerindedir. Piyasada farklı türde boyaların bulunmasının sebebi budur. Kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı farklı olan bu boya türlerinin yapması gereken şey tam bir koruma sağlayarak maddenin etrafını sarıp kabuk oluşturup çevre ile teması önlemektir.

Korozyona karşı koruma işlem sırasını aşağıda inceleyebiliriz;

- Boya, malzeme yüzeyi ile çevre arasındaki ilişki keserek yalıtkan bir ortam yaratarak korozif ortam etkilerinin önüne geçer ve oluşabilecek olan korozyon tepkimelerini önüne geçer.
- Boyaların bazı türlerinin pigmentlerinin içeriğinde inhibitör etkisi vardır. Bu inhibitör etkisine sahip olan pigmentler malzeme yüzeyinin pasifleşmesine etki eder.

Dolgu malzemesi olarak içeriğinde çinko tozu olan boyalarda çinko galvanik etki oluşturarak malzeme üzerinde katodik olarak koruma etkisi yaratır. 20 yıla kadar

korozif ortamdan malzemeyi korozyona karşı etkili bir şekilde koruyabilen iki bileşenli polimer boyalarda piyasaya sürülmüştür (Gülensoy, 2006).

### **2.3.3.3. Metalik kaplamayla koruma**

Kaplanacak metalin üzerine bu metalden korozyon etkilerine karşı daha yüksek dayanıma sahip soy bir metal ya da bu metali korumak için kendisi çözünen başka bir metal ile kaplanması yöntemidir. Çözünen bu malzeme ana malzemenin korozyona uğramasına engel olur. Bu durumdan anlaşılacağı gibi kaplama malzemesi daha aktif bir malzemedir. Çelik üzerine kalay kurşun veya krom, bakır üzerine altın veya gümüş gibi kaplamalar birinci tip diğer adıyla soy metal kaplamalardır. Aktif kaplamalar yani ikinci tip kaplama malzemeleri ise çelik madde üzerine çinko, alüminyum ve kadmiyum gibi kaplamalar örnek verilebilir.

Soy metal malzeme ile gerçekleştirilen kaplama işlemi sırasında gerçekleşen hatalar, oluşan kaplama hataları sonucu meydana gelen gözenekler yüzünden kaplanan metalin o bölgesi açık kalarak soy metal kaplamaya göre anot duruma geçer ve bu kısımlarda büyük katot küçük anot etkisiyle yüksek tahribatlı korozyon oluşturur. Böyle durumlarda karşılaşmamak için metalin kaplaması çok özenli bir şekilde yapılmalıdır en ufak hata yüksek korozyona sebep olur. Kaplamanın aktif metaller ile yapıldığı metallerde ise bu oluşan hatalı kaplama durumu sonucunda aktif metal kendini harcayacağı için korozyon olayı kaplama altındaki metalde gerçekleşmez. Bu durumda aktif metal bir nevi katodik koruma görevi üstlenir ve kendini kurban anot olarak kullanır. Diğer bir yöntemde aktif olan metal yüzeylerini fosfat ya da kromat tabakası ile kaplamaktır. Bunun sayesinde aktif metalin çözülme olayı yüksek oranda düşmüş olur.

Kaplamanın metalik olması sadece korozyonla mücadelede etkin bir yöntem olmak dışında görsel olarak da malzemelerin işlevselliğini ve kullanılabilirliğini arttırmaktadırlar. Çok katmanlı tabakalarda uygulamak mümkündür hem korozyondan koruma amaçlı hem de malzemeye görsel özellikler katmak amaçlı olarak.

Metalik kaplamaların materyal içeriği yan içerdikleri farklı elementler korozyona uğrama dirençlerinde büyük oranda farklılıklar yaratabilir. Metalik kaplamalar yapılırken ne tür bir kaplananın ya da hangi elementleri içereceğini belirlemede, kaplanacak maddenin dayanım ömrü, görsel, ortam, kaplama malzemesinin kullanım ömrü, kaplanacak maddenin geometrik özellikleri, ileride oluşabilecek herhangi bir imalat durumuna ve mekanik gibi etkenler belirleyici olur.

Korozyona karşı direncin en uygun şekilde olabilmesi için metalik kaplamalarda metalik malzemenin, koruyacağı parça, kaplama türü, karşı karşıya kalacağı ortam etkileri, birden fazla kaplama olup olmadığı ve kaplamanın uygulanış biçimi gibi faktörler önem taşımaktadır.

#### **2.3.3.4. Pe (polietilen) kaplama**

Toprak altında kalan çelik boruların korozyondan korunması için gerekli olan borunun dış yüzeyine uygulanan kaplama çeşitlerinin en dayanıklı olanıdır.

Günümüz şartlarında en fazla 3 katlı PE dış kaplama tercih edilmektedir. Boru ile direkt temasta bulunan alt katman PBE (toz epoksi) tabakası katodik olarak soyulmaya karşı yüksek oranda direnç gösterir. Dış ortam ile temas eden en üst tabaka ise oldukça yüksek mekanik koruma sergilemektedir.

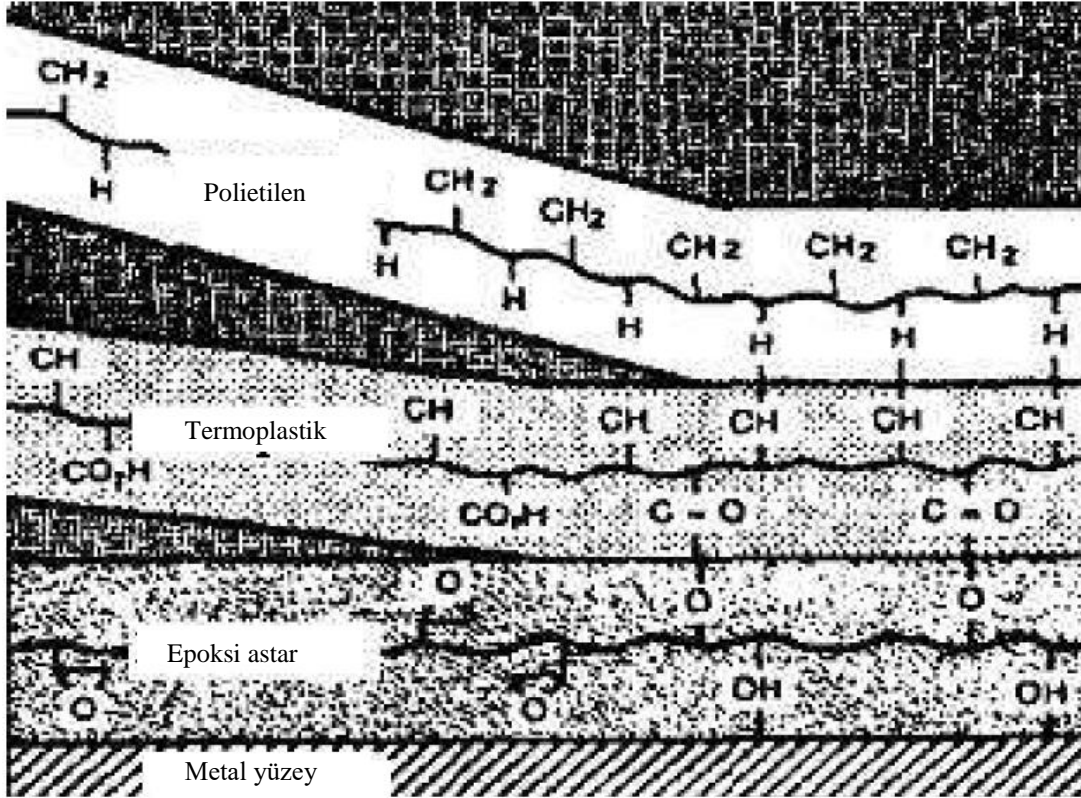
PE kaplama, epoksi kaplama ya da bitüm kaplamayla kıyaslandığı zaman aşağıdaki listelenmiş üstünlüklere sahiptir.

- Darbelere karşı direnci yüksektir.
- Yaşlanma dayanımı yüksektir.
- Mekanik ve kimyasal direnci diğer kaplama türlerine göre üstündür.
- Isıya karşı olan direnci bitüm kaplamaya göre daha yüksektir.
- Potansiyel farklara karşı elektriksel yalıtkanlığı üstündür.

Polietilen kaplama özellikle tehlikeli gaz (doğalgaz vb.) veya sıvı taşıyan hatlarda (petrol vb.) uygulama yapılabilecek çelik borularda kullanılabilir. Amerikan API 5L ve Avrupa EN ISO 3183 normundaki dikişli çelik borular petrol ve doğalgaz boru hatlarında kullanıma en uygun boru tiplerindedir.

Polietilen kaplama yangın hidrant hatları, isale hatları, atık su hatlarında kullanılabilir en güvenilir ve sorunsuz kaplama türlerindedir.

Şekil 2.40'ta üç katlı bir PE kaplama mekanizması sistemi görüntülenmekte ve ardından bu katlar isimlendirilmektedir.



Şekil 2.40 Üç katlı pe kaplama (Bıyık, 2013)

- 1. Kat: Korozyon koruması; Epoksi astar, toz boya
- 2. Kat: Ara kat; Termoplastik
- 3. Kat: Mekanik koruma; PE 'den oluşmaktadır

### 2.3.3.5. Ziftleme

Ayrımsal damıtma sonucu katran veya benzer diğer organik maddelerin geride bıraktıkları atık zift olarak bilinir. Uygulanacak madde 250 °C üzerindeki sıcaklıkta tavlınır veya zift sıcak iken madde üzerine sürülerek ziftleme işlemi yapılır. Anlatılan bu işlemler haricinde özel püskürtme tabancaları ile belli bir basınç altında püskürtme işlemi yapılarakta ziftleme işlemi yapılabilir (Gülensoy, 2006).

### 2.3.3.6. Biyolojik kaplama

Deniz suyuna direkt temas alinde bulunan metalleri oluşacak olan korozyon olayından korumak için biyolojik kaplama kullanılır. En çok gemi gövdeleri gibi metal yüzeylerinin deniz suyuna direkt teması bulunan kısımların a uygulanır. Başka kaplama türlerinden en önemli üstünlüğü ise deniz ekosisteminde yaşamını devam ettiren canlılar üzerine herhangi bir zararlı atık veya toksit bırakmamasıdır. Bu nedenle gemicilik sektöründe yeri oldukça önemlidir. Metal ile deniz suyu reaksiyonu sırasında korozyon

atığı olarak hidrojen sülfür meydana gelir. Şu anki teknolojiler sayesinde hidrojen sülfür oluşumu inhibitörler ve biyosid adı verilen organizma öldürücü kimyasallarla sağlanabiliyor. Fakat bu teknolojilerin kullanılması sırasında ilk maliyetleri yüksek olup ve deniz ekosistemine önemli derecede zararları bulunduğu için pek yaygın kullanılan bir yöntem değildirler.

#### **2.3.4. İnhibitörle koruma**

Korozif özellikleri bulunan çevreye belirli ölçü ve miktarda karıştırıldığı zaman çevrede bulunan korozyona uğrayabilecek olan madde üzerindeki oluşabilecek korozyonu durduran veya en aza indireyecek olan malzemelere korozyon inhibitörü denir. Yüksek maliyetlere sebep olacak korozyondan korunma türleri ya da yüksek maliyetli korozyona karşı dirençli olan madde kullanmak yerine bu inhibitörleri kullanmak daha ucuz ve daha pratik bir korozyondan koruma yoludur. İnhibitörleri kullanmak çukur tipi korozyonu önlemede en kullanışlı ekonomik ve kesin çözüm yollarındandır.

İnhibitörlerin korozyon hızı azaltıcı mekanizması farklı türlerde oluşabilir. Metal yüzeyi üzerinde ince film tabakası oluşturan bazı tür inhibitörler vardır. Bunlar çevre ile metalin arasındaki korozyon tepkimesi hızını düşürür. Korozif bir ortamda bulunan korozyon yapıcı elementlerin inhibitörler tarafından kimyasal olarak hapsedilmesi ile korozyon oluşumunun önüne geçilebilir. Bu duruma örnek olarak oksitleyici özelliği olan sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ), nitrik asit ( $HNO_3$ ), fosforik asit ( $H_3PO_4$ ) gibi asitlerden oluşan korozif bit ortamın asit konsantrasyonunu silikat, nitrat gibi inhibitörlerle düşürerek korozyonun önüne geçilebilir (Mutlu, 2010).

#### **2.3.5. Anodik ve katodik koruma**

Korozif bir ortamda bulunan metallerin korozif bileşenlerin etkisi ile çözünmesini önlemek amacı ile metale dışarıdan bir akım uygulayarak koruma sağlanır. Anodik korumada sistem mekanizması ve tepkimeler pasifleştirme üzerine kurulur. Bu pasifleştirme işlemi sırasında metal yüzeyi üzerinde pasif film tabakası oluşturularak korozyonu yavaşlatmak amaçlanır. Fakat çoğu metal bu pasifleştirme özelliğini gösteremez ve kısıtlı olarak kullanımı mevcuttur. Aynı zamanda korozyonu ortadan kaldırmaz korozyonun azalmasına sınırlı ölçüde yardımcı olabilir. Bu sebepten dolayı anodik korumanın temel ilkelerinden başlıcası olarak korozyon oluşum mekanizmasını yavaşlatmak olduğu denilebilmektedir.

Dışarıdan verilen akım sayesinde metal anodik koruma ile devamlı olarak pasif kısımda durdurulur. Korozyon akımının en alçak olduğu durum pasif haldir. Bazı çözeltilerde küçük korozyon akımı daima yeteri oranda küçük değildir ve bu korozyondan koruma türü sorunu çözmez. Sistem arıza verdiği takdir de metal aktif kısma çok kısa zaman içerisinde geçmiş olur ve korozyon olayı ortaya çıkar. Buna sebebiyet verebilecek bir arızaya yer vermemek için akım ve potansiyel kontrollerinin dikkatlice ve sıklıkla gerçekleştirilmesi sistem verimliliği ve maliyetleri açısından oldukça önemlidir.

Anodik koruma sıklıkla çok yüksek oranda korozif özelliği bulunan ortamlarda korozyon hızını önemsenecek dereceye indirmek amacıyla sistemin korozyonunu düşürmekte kullanılır.

Yalnızca pasifleşebilme özelliği bulunan metal ve metal alaşımlarında anodik koruma gerçekleştirilir. (Cr, Fe, Ni, Ti ve alaşımları gibi) Çok küçük oranlarda akım yoğunluğu metalin pasif bölgede tutulmasına yetecektir. Bu çok küçük oranlarda akım yoğunluğunu sağlayacak olan anodik koruma sistem yapısı karışık ve oldukça yüksek kurulum maliyetine sahiptir (Gülensoy, 2006).

Katodik koruma olayı temelinde elektrokimyasal korozyon teorisine bağlı olarak malzemelerin korozyondan anodik koruma düzeneğinden farklı olarak akın ihtiyacı yanında kurban bir elektrotu anot olarak gözden çıkarıp metalin harcanması yerine kurulu sistemde bu anodu harcama prensibine dayalı olan bir korozyondan koruma yöntemidir. Katodik koruma kısa bir biçimde korunacak olan metali oluşturulacak bir elektrokimyasal hücrenin katodu haline dönüştürerek metalin yüzeyinde bulunan anot akımların ötelenmesi işlemidir (Arkatodikkoruma.com, 2013).

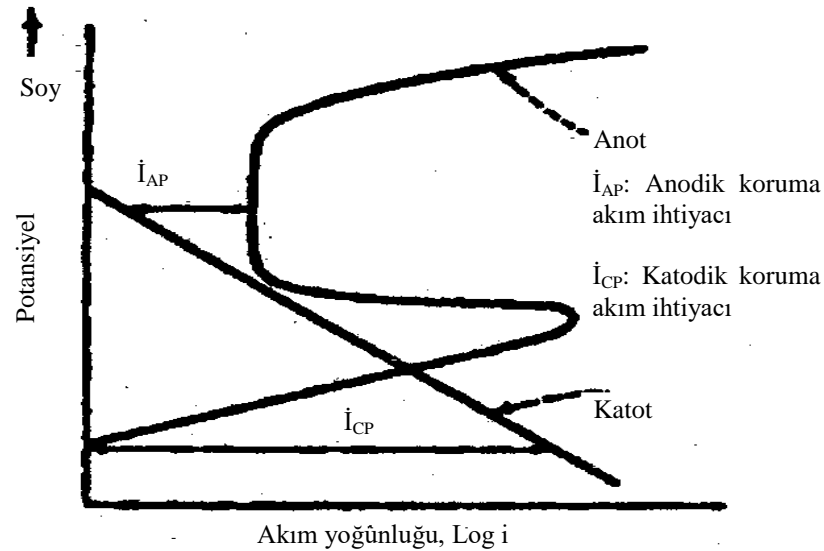
Korunacak olan metali ondan daha da aktif olan bir metal ile (galvanik anot veya kurban anot) birbirine bağlayarak kullanılacağı gibi dışarıdan bir akım uygulayarak da katodik koruma uygulanabilir.

Katodik koruma esnasında zaman içinde bitip tükenen galvanik anotların belirli aralıklarla yenilenecek katodik koruma sisteminin yenilenmesi ve sürekliliği sağlanması gerekmektedir. Öte yandan katodik koruma sırasında metal ve anot çifti arasında belli bir akımın üretilmesine gerek kalmayan ikinci bir yöntem vardır. Bu yöntemde katodik koruma için gerekli olan akım ihtiyacı dışarıdan dış kaynaktan sisteme bağlanır ve korozyondan karşı koruma sürekli bir akım ile devam eder. Ekonomik ve yavaş çözünürlüğe sahip olan maddeleri anot malzemesi olarak kullanmak gereklidir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma mekanizmalarında Fe-Si, Pb-Sb-Ag ve Ti elementli anotlar kullanılabilir. Galvanik anotlu katodik koruma mekanizmalarında ise sistem içerisinde kullanılacak olan anotlar çinko, magnezyum ve alüminyum olur.

### 2.3.5.1. Katodik ve anodik koruma sistemlerinin kıyaslaması

Bu iki sisteminde ana amacı elektrokimyasal yöntemler ile birlikte malzemenin korozyondan korunarak kullanım ömrünü uzatmaktır. Uygulanmaları esnasında farklılıklar bulunur. Katodik koruma uygulanırken malzeme katodik olarak polarize edilir termodinamik olarak sabit bulunduğu bölgeye yerleşir. Malzemenin teoride bu stabil bölgede korozyona maruz kalması pek mümkün görünmemektedir. Anodik koruma sistemlerindeyse metal anodik olarak polarize edilir ve pasiflik potansiyelinden daha pozitif bir haldeki potansiyele yerleşir. Teoride bu kısımda metal korozyona uğramaya devam eder fakat korozyon hızı oldukça düşük hızlarda devam eder. Katodik koruma sistemlerinde korozyon tamamen durduğu halde, anodik koruma sistemlerinde ise korozyon minimal düzeyde dahi olsa devam etmektedir. İşte tamda bu noktada bu iki sistem arasındaki farklar ortaya çıkmaktadır. Aralarındaki bir diğer fark ise anodik koruma sistemlerinde uygulanacak olan dış akım ( $i_{AP}$ ), pasif kısımda içerisinde kaldığından dolayı katodik koruma sistemlerinde uygulanan ( $i_{CP}$ ) akımına göre yüksek oranlarda azdır. Aşağıdaki şekilde korozyona uğrayan bir metalin anodik ve katodik koruma sistemlerindeki akım ihtiyacı verilmiştir (Şekil 2.41).



Şekil 2.41 Anodik ve katodik koruma sistemlerinin akım ihtiyacı değerleri (TS 5141, 1987)



Anodik ve katodik koruma sistemleri arasında kıyaslamalar yapılırken Katodik koruma sistemlerinin bütün metal ve metal alaşımlarına uygulanabileceği bunun yanında anodik korumanın ise yalnızca pasifleşebilme özelliği bulunan metallere uygulanabildiğini göz önünde tutmak gerekir. Anodik koruma sistemlerinde ise önemli olan konu yardımcı elektrik olarak uygun bir katot metalinin tercih edilmesidir. Katodun imkânların izin verdiği oranda düşük hidrojen aşırı gerilimli olması aşırı derecede önemlidir.

Malzemede korozyon ortamının etkisiyle oluşabilecek olan korozyon olaylarının önlenmesi amacıyla uygulanan anodik ve katodik koruma türlerinin kriterleri aşağıdaki çizelgede karşılaştırılarak özetlenmektedir (Tablo 2.4).

**Tablo 2.4** Katodik ve anodik korumanın kıyaslanması (Gülensoy, 2006)

<b>KRİTER</b>	<b>KATODİK KORUMA</b>	<b>ANODİK KORUMA</b>
<b>İŞLETME ŞARTLARI</b>	Katodik koruma potansiyel kriterleri belirlidir.	Pasifleşme potansiyelinin tam olarak belirlenmesi gerekir.
<b>AKIM İHTİYACI</b>	Yüksek (Elektrolit ve kaplamanın Türüne göre değişkenlik gösterir)	Düşük (pasiflik akımının ihtiyaç duyduğu kadar)
<b>ELEKTROLİT CİNSİ</b>	Zayıf ve orta derecede korozyon çözeltiler içinde uygulanabilir.	Şiddetli korozyon özellikte olan çözeltiler içinde uygulanabilir.
<b>TRAFO ÜNİTESİ</b>	Akım veya potansiyel kontrollü	Potansiyel kontrollü
<b>UYGULAMA ALANI</b>	Tüm metal ve metal alaşımlarına uygulanabilir.	Sadece pasifleşme özelliği bulunan metal ve metal alaşımlarına uygulanabilir.
<b>MALİYET</b>	Yapım, Bakım ve onarım maliyeti düşük, işletme maliyeti yüksek.	Yapım, Bakım ve onarım maliyeti yüksek, işletme maliyeti düşük.
<b>KOROZYON DURUMU</b>	Korozyonun önüne tamamen geçilir	Korozyon minimum düzeyde devam eder

## 2.4. Katodik Koruma

Katodik koruma esaslı sistemler toprak altı ve sıvı içerisinde kalan metalik malzemelerin bu ortamlardaki korozif etkenlerden kaynaklanan korozyonun önüne geçmek ya da geçemese de korozyonun kontrollü bir şekilde gerçekleşmesi için uygulanan elektrokimyasal tür metottur. Temel ilkesi elektrokimyasal korozyon teorisine dayanmaktadır. Bu teoriye göre elektrokimyasal bir hücrenin içerisinde bir akım geçtiği zaman anot kısmında oksidasyon tepkimesi, katot kısmında ise bu tepkimeyle eşit değerde redüksiyon tepkimesi gerçekleşir. Bu tip sistemlerde katot kısmında korozyon durumu kesinlikle gerçekleşmez. Bu teoriye göre metalin yüzeyinde bulunan anot kısımları katot hale dönüştürülerek korozyon durumu net bir şekilde önlenmiş olur.

Katodik korumanın uygulanabilmesi için, aynı elektrolit içine anot görevi yapması için başka bir metal konulur. Anot korunacak olan malzemeden daha aktif bir malzeme ise bu malzemelerin arasında bir galvanik pil oluşur. Oluşan bu devreden kendiliğinden akım oluşur ve geçer. Korunacak olan malzeme de bu galvanik pilin katodu görevinde olacağından dolayı korozyon olayı malzemede gerçekleşmez. Devreden geçen akımla aynı oranda anot kısmını oluşturan malzeme çözünür ve iyonlarına ayrılır. Bu durumda oluşan galvanik anotlu katodik koruma sistemi galvanik pil mantığıyla oluşur.

İnert anotlar ile de katodik koruma uygulaması yapmak mümkündür. Bu tarz inert anotlu katodik koruma uygulaması için dışarıdan bir doğru akımın sisteme eklenerek uygulamanın başlatılması gerekmektedir. Sisteme eklenen bu doğru akım kaynağı sağlayan aletin pozitif ucu anoda, negatif ucu ise uygulama sırasında korunması gereken maddeye bağlanmalıdır. Bu oluşum sırasında elektroliz hücresi gerçekleşmiş olur. Bu oluşan elektroliz hücresinde anotta oksidasyon tepkimeleri gerçekleşirken katot kısmında ise redüksiyon tepkimeleri gerçekleşir. Anot bölgesinde gerçekleşen tepkimeler sırasında metalde çözünme gerçekleşmez. Anot kısmında inert metaller kullanıldığından dolayı elektrolit cinsine bağlı olarak oksijen çıkışı ya da klor çıkışı gibi çeşitli oksidasyon tepkimeleri gerçekleşmektedir.

Katodik koruma sistemlerinin uygulama alanları:

- Deniz rıhtımlarının çelik kazıkları
- Yangın tesisatı sistemleri
- Toprak üstü yada altında bulunan likit depolama tanklarının iç kısımları

- Yeraltında bulunan yakıt tankları ve toprak seviyesinde bulunan takların taban kısımlarına
- Petrol ve yakıt dağıtım şebekeleri
- İçme suyu dağıtım şebekeleri
- Doğalgaz dağıtım şebekeleri
- Sıkıştırılmış hava dağıtım şebekeleri
- Kanalizasyon sistemleri
- Deniz iskele çelik kazıkları
- İnşaat kolon sistemlerinin yapımında kullanılan demirler
- Boiller kazanları
- Isı eşanjörler ve serpantinler
- Isıtma ve soğutmada kullanılan soğutucu akışkanların aktığı sistemler

*Katodik koruma sistemleri:*

Katodik koruma sisteminde, koruma yapılacak olan metal malzemeyi uygulanacak olan elektrokimyasal hücrenin katodu haline getirilerek metal malzeme yapısında gerçekleşmekte olan anodik tepkimelerin önüne geçilmesi esastır. Katodik koruma sistemleri sayesinde korunmak istenen malzemeye elektron akışı sağlanarak malzemenin yapısının iyonlaşmasının önüne geçilir ve malzeme yüzeyi korozyonun olumsuz etkilerinden kurtulmuş olur. Katodik koruma sistemlerinin malzemeyi koruma amaçlı istenen elektronlar;

- Koruması sağlanacak olan metal malzemedan daha anodik yapıya sahip olan metal malzeme ile galvanik çift meydana getirilerek,
- Doğru akıma sahip bir dış akım sağlayıcı kaynak ile elde edilebilir.

Belirtilenler ışığında katodik koruma sistemlerinde iki çeşit uygulama şekli görülür;

- Galvanik anotlu katodik koruma sistemleri
- Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri

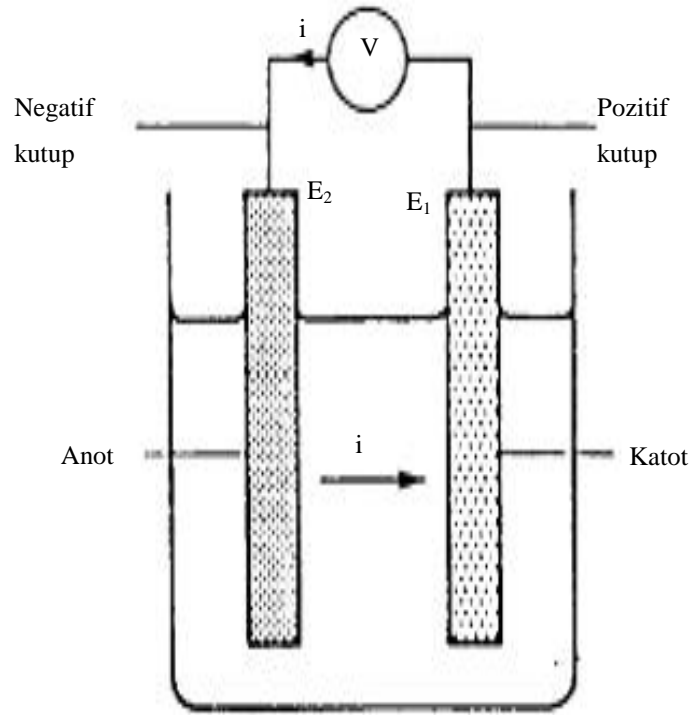
Bu iki çeşit katodik koruma sistemlerinin hangisinin kullanılacağı, katodik koruma uygulanacak olan çevrenin özellikleri, kullanılacak sistem ve uygulama maliyetleri ve yapının cinsine bağlı olarak belirlenir.

#### 2.4.1. Katodik koruma sistem mekanizması ve kriterleri

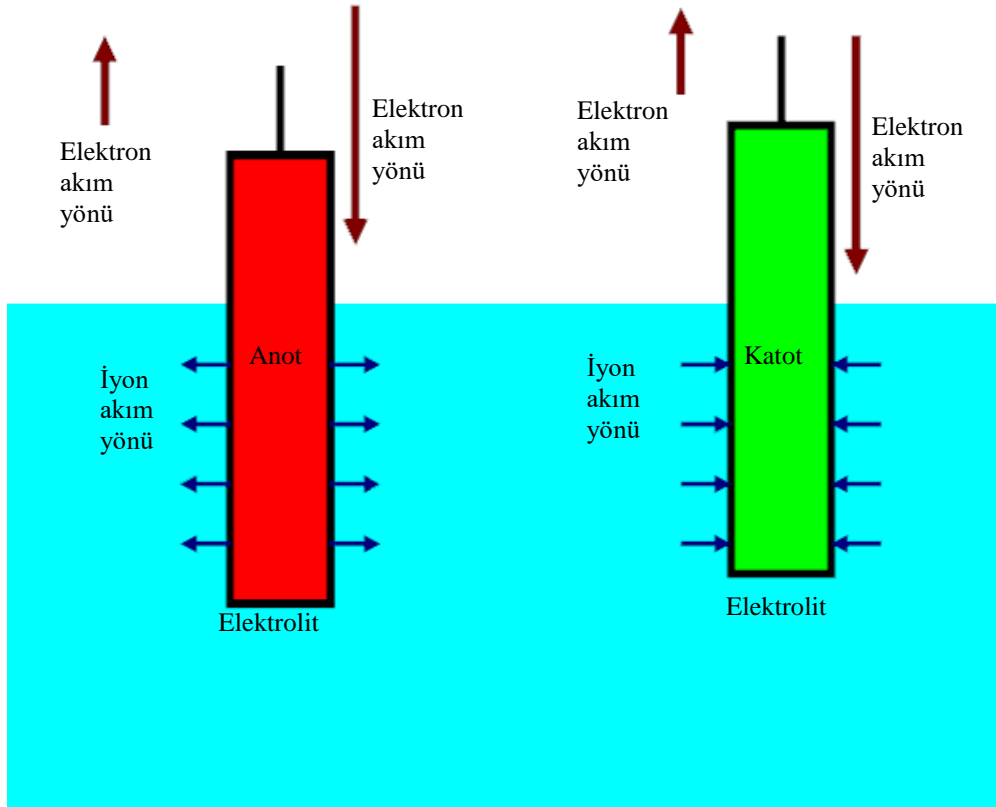
Katodik koruma esnasında katot da gerçekleşen reaksiyon anot tarafından akan elektronlar kullanılarak mümkün olabilir. Katot bölgede anottan akan elektronlar kullanılmazsa eğer anot kısmında oksidasyon reaksiyonları gerçekleşemez. Buradan varılması gereken sonuç ise katot kısmında oksijen yeteri kadar yok ise korozyon olayının gerçekleşmesi beklenmez.

Katodik koruma esnasında katot reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken elektronlar dış bir akım kaynağından alınıyor ise anot kısmındaki reaksiyonla elektron akışı gerçekleşmez. Oluşamayan bu elektronlar sayesinde anot kısımdan ilerleyen korozyon durumu da gerçekleşmemiş olur. Dış akım kaynaklı katodik koruma mekanizması ile korozyondan koruma yöntemi anlatılan bu elektrokimyasal ilke çerçevesinde gerçekleşir (Yalçın ve Koç, 1999). Korunacak olan malzemeye dışarıdan verilen akım ile elektronlar malzeme yüzeyine ilerleyerek anodik reaksiyonları tamamen durdurabilirken, katodik reaksiyonun hızını da arttırıcı etkide bulunur. Anot kısmında gerçekleşen tepkimeler artık koruma altında bulunan malzemenin yüzeyinde gerçekleşmek yerine katodik koruma sistemine bağlı olan yardımcı anot bölgesinde gerçekleşir. Korunan malzemenin yüzey kısmı ise tamamen katot olarak sistemde yerini alır.

Korozif bir ortamda bulunan metalin korozyona uğraması sırasında kendisinden daha aktif olan bir metale yani galvanik bir anota bağlanması durumunda, katot reaksiyonun gerçekleşmesine yardımcı olacak elektronlar sisteme bağlanan galvanik anot metalinin üzerinde kendiliğinden gerçekleşip ilerleyen yükseltgenme reaksiyonuyla karşılanır (Şekil 2.42). Bu durum sonucunda korunan metalin yüzeyinde ki anodik reaksiyonlar gerçekleşmez. Galvanik anotlu katodik koruma sistemi bu sistem çerçevesinde gerçekleşir. Bu koruma sisteminin asıl amacı bir ortamdaki korozif koşullara karşı ortamda bulunan metalin sabit bir potansiyel sınırının altında metali toprağa göre daha negatif yüklü hale getirerek her çeşit korozyon türünden oluşabilecek korozyonun önüne geçmektir.



Şekil 2.42 Elektrokimyasal hücre



Şekil 2.43 Metalin korozyona uğraması ve bu durumun önüne geçmek için katodik koruma mekanizması

Metal malzemenin her bir yerinden birim alana sürekli bir şekilde akım devam etmektedir (Şekil 2.43). Sürekli olarak devam eden bu akım yoğunluğu, yapılan kaplamanın korozyon dayanımına ve o kısımdaki oluşan potansiyel farkına bağlı olarak ilerler. Metalin toprak ya da deniz ile arasında oluşacak bağın minimum potansiyelde olması gerekmektedir. Koruma türünün seçilmesindeki asıl ölçütte budur. Referans olarak genel olarak bakır ve bakır sülfat (Cu ve CuSO<sub>4</sub>) elektrotlar alınarak ölçümler yapılır. Ölçümlerin sonucunda elde edilen verilerin sağlanması gereken bazı kriterleri sağlaması durumunda katodik koruma tipinin güvenilir olup olmadığı saptanır.

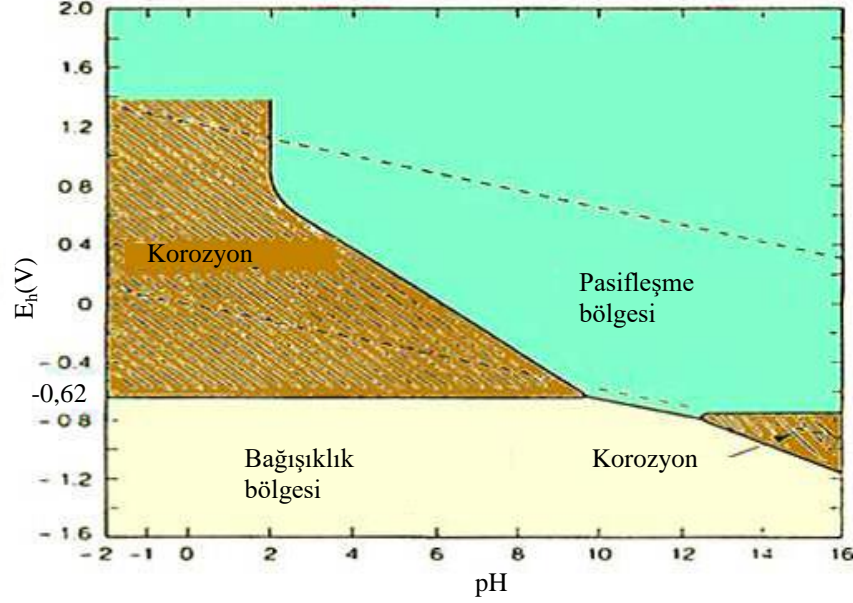
Metal potansiyelinin belirli bir değerde polarize edilmesi bu metal yapının katodik olarak korunup korunamayacağı belirlenir. Bir sistemin de katodik olarak korunup korunamayacağını dört kriter belirler.

#### **2.4.1.1. 100 mV polarizasyon kayma kriteri**

100 mV değerindeki polarizasyon kayması çelik yapılarda sağlanması gereken ve güvenilir bir kriter olmaktadır. Bu değer bulunurken sistem minimum 4 saat boyunca katodik olarak bir akıma maruz bırakıldıktan sonra ölçülen potansiyel değer ile sistemin akıma maruz bırakılmadan önceki potansiyel değeri arasındaki farkı hesaplanarak ortaya çıkar. Teorik olarak uygulanış biçimi bakımından güvenilir bir kriterdir. Bunun sebebi ise omik düşüşün etkisine rastlanmayıştır.

#### **2.4.1.2. (-) 850 mV kriteri**

Demir maddesinin termodinamik olarak stabil halde olabilmesi için  $-0,62$  V değerinden daha negatif bir potansiyelde olması gerekir ve demir bu bölgede korozyona uğramaz (Şekil 2.44). Eğer demir bu potansiyel değerde kalırsa demir katodik olarak korunmuş olur. Hidrojen elektrotuna göre  $-0,62$  V olan bu potansiyel değeri doygun bakır/bakır sülfat referans elektrotuna göre  $-0,850$  Volt değerine denk gelir. Bu değer demir ve çelik malzemelerin katodik olarak korunmasında kriter olur (Yalçın ve Koç, 1999).



Şekil 2.44 Demir-su sistemi için oluşan pourbaix diyagramı

-850 mV kriteri uygulama kolaylığı sayesinde katodik koruma sistemlerinde malzemenin korunup korunmadığı belirlemede sıklıkla kullanılır. Çelik bir sistemin doymuş durumda olan bakır veya bakır sülfat referans elektrotuna göre belli bir akım altında ölçü aleti tarafından ölçülen akımın değeri katodik olarak korunması için -850 mV ya da daha negatif bir değerde okunması gerekmektedir. Katodik olarak korunan bir sistem anaerobik bir zemin yapısında ise, ölçü aletinde ölçülen değer -950 mV ya da daha negatif bir değerde olması gerekmektedir. Katodik olarak korunan bir sistemde boru/zemin potansiyeli sisteme minimum 4 saat akım verildikten sonra sistem bu akım altındayken ölçüm yapılır (Arkatodikkoruma.com, 2013).

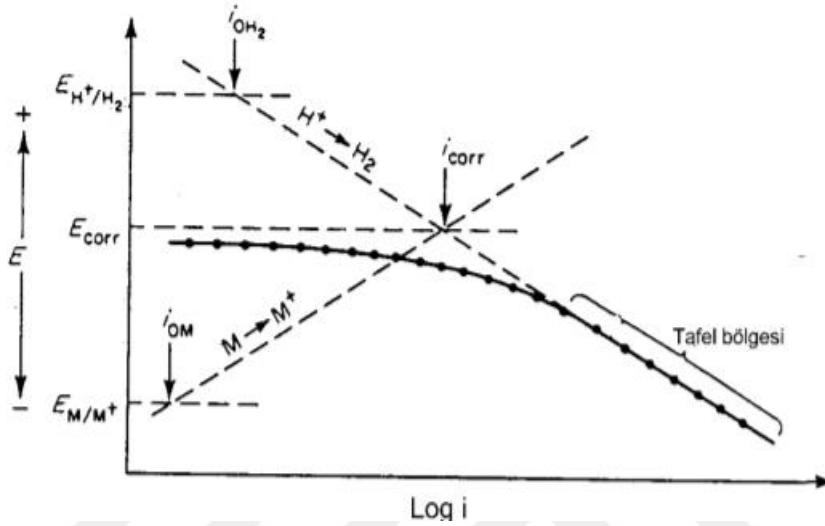
Kolay uygulanabilirliği sebebiyle -850 mV kriteri tercih nedenidir. Fakat bu kriter nötr ya da yakın pH değerlerinde ve düşük sıcaklıklarda net bir sonuç verir.

#### 2.4.1.3. 300 mv değerine potansiyel kayması

Katodik koruma çelik yapıların potansiyeline uygulandığında denge halindeki potansiyel değerinin negatif yönde 300 mV değerine kadar indirilmesi gerekmektedir. Çelikten oluşan sistemlerin potansiyellerinde katodik koruma akımı verilirken, sabit halde bulunan potansiyelinin negatif olarak 300 mV değerine kadar bir düşüş sergilemesi gereklidir. -850 mV kriterinden farklı olarak denge halinde potansiyelinin -550 mV değerinden küçük olması durumunda katodik korumanın -850 mV değerinden daha düşük bir potansiyel değerinde sağlanabileceğinin mümkün olduğunun kabul edilmesidir.

#### 2.4.1.4. Tafel bölgesi başlama noktası

Katodik koruma olayının başlamış bulunduğu potansiyeli E-log i grafiği çizildiğinde lineer kısmın başlamış olduğu noktaya denk düşen potansiyel olarak bulunabilir. E-log i ölçümleri sayesinde hem en düşük koruma için akım ihtiyacı, hem de koruma potansiyeli bulunabilir (Şekil 2.45). Bu deneyi saha da yapmak oldukça güçtür yalnızca laboratuvarlarda gerçekleştirilebilir (Yalçın ve Koç, 1999).



Şekil 2.45 Tafel eğrisi korozyon başlangıç noktası

Yukarıdaki grafikte katodik polarizasyon eğrisindeki tafel kısmının korozyon potansiyeline ekstrapolasyonu verilmiştir. Teorik açıdan bakıldığı vakit anodik polarizasyon bölge eğrilerinin de katodik polarizasyon eğrilerindeki gibi doğrusal bir tafel bölgesinin oluşması gerekmektedir. Bazen anodik polarizasyon eğrileri istenilen standart halde bulunmayabilir. Anodik polarizasyonun oluşacak olan eğrileri aşağıda belirtilen nedenler ile olması gereken durumdan sapabilir.

- Oluşan anodik tepkimeler, çözünme tepkimeleridir. Bundan dolayı anota yakın olarak oluşan çözeltinin derişim özellikleri çok az bir süre içerisinde değişiklikler gösterir.
- Gerçekleşen çözülme olayının bitimi esnasında metalin yüzey kısmında da değişiklikler oluşur.
- Sistem mekanizması içerisinde oluşan korozyon atıkları metalin yüzey alanı boyunca çözünmeyen tortu şeklinde çökelti oluşturarak metalin pasifleşmesine sebep verir.

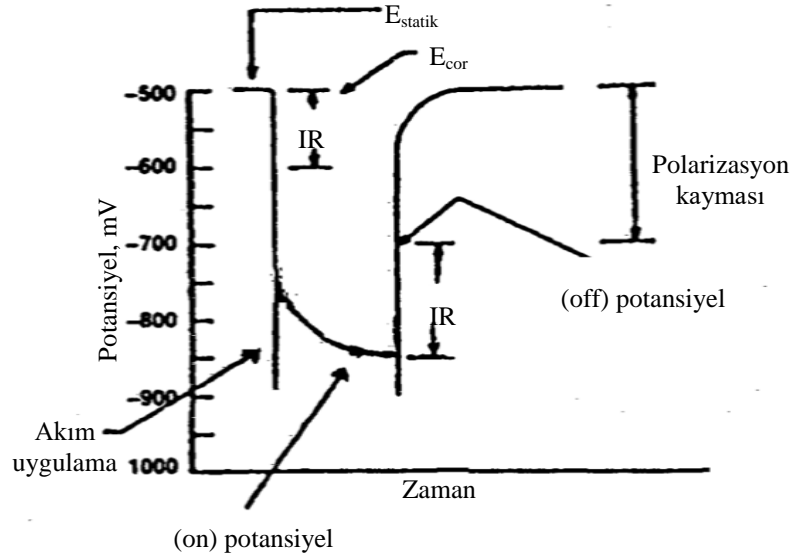
-850 mV kriteri kendine galvanik ve dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin her ikisi içinde uygulama alanı bulur. Galvanik anotlarla yapılan koruma



sistemlerinde sistemde -850 mV'luk potansiyel, uygun anot kullanılarak, dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde ise sisteme uygun akım belirlenerek yapılır (Şekil 2.46).

Bahsi geçen katodik koruma sistem kriterlerinin güvenilir olup olmadığı aşağıdaki örnek ile daha iyi anlatılabilir.

- Doygun haldeki bakır veya bakır sülfat referans elektrotuna göre ölçülen statik potansiyel
- $E_s = -500$  mV
- Katot yönünde akım verildikten sonra boru/zemin potansiyeli
- $E_{on} = -850$  mV (-850 mV kriterinin uygunluğunu sağlayan katodik koruma)
- Oluşan son durumdaki potansiyel kayması
- $E_{on} - E_s = -350$  mV < -300 mV (300 mV kriterine uygun olan katodik koruma)



Şekil 2.46 Katodik korumaya ait potansiyel kriterleri

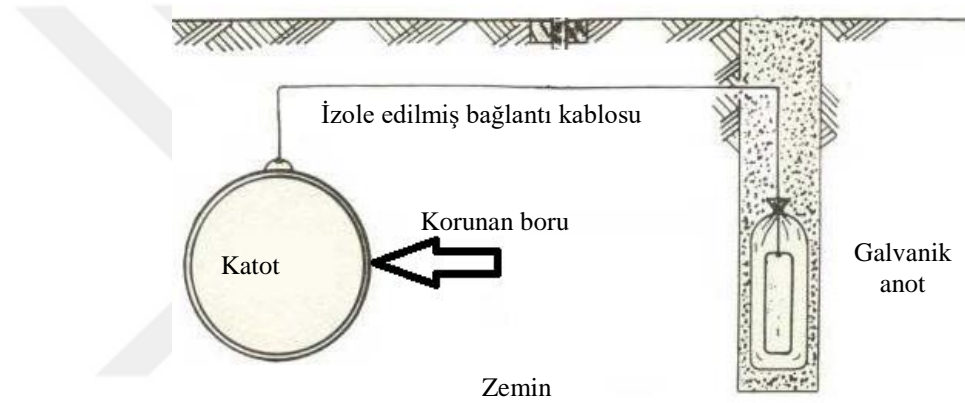
- Sisteme verilen akım durdurulduğunda oluşan boru-zemin potansiyeli
- $E_{off} = -700$  mV
- Sistemde gerçekleşen polarizasyon kayması
- $E_{off} - E_s = -200$  mV < -100 mV (100 mV potansiyel kayma kriterine uygun katodik koruma)

Sisteme verilmiş olan akım durdurulduğunda 100 mV'luk omik bir gerilim azalması gerçekleşmektedir. Akımın etkisindeki potansiyel, katodik olarak korunan sistemin gerçek metal yapı/zemin potansiyeli değildir. Sistem içindeki akımı durdurduktan sonra oluşan potansiyel katodik korumanın güvenilirliğinin

belirlenmesindeki en başarılı kıstastır. Bir katodik koruma sisteminin güvenilir olup olmadığı koruma sisteminde oluşan polarizasyon kaymasıyla belirlenir. Eğer kayma var ise sistem güvenlidir denilebilir.

#### 2.4.2. Galvanik anotlu katodik koruma sistemleri

Korunması sağlanacak olan metal yapıya galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde korunması için bu metal yapıdan daha negatif bir potansiyele sahip olan bir metal anot olarak bağlanarak galvanik bir pil hücresi gerçekleşmesi sağlanır (Şekil 2.47). Böylelikle metal yapıya sahip malzeme katot şekline getirilir. Galvanik anotlar, bulunduğu korozi ortamda pozitif iyonlar şeklinde ayrışarak akım üretmeye yarayan elektrotlardır.



Şekil 2.47 Galvanik anotlu katodik koruma sistem mekanizması

Galvanik anotlar zemin altında kendiliklerinden ayrışarak tıpkı pile benzer bir akım açığa çıkartırlar. Galvanik anot olarak bağlanan metalin spontane gelişen yükseltgenme tepkimesiyle ayrışmanın ardından ortaya çıkan elektronlar, bağlantı elemanı ile korunan sisteme taşınır ve katodik tepkimeyi yürütecek elektronları yükler. Oluşan bu akım sayesinde korunan sistem yüzeyinde oluşabilecek tüm anodik tepkimelerin önüne geçilerek korozyon olayı engellenmiş olur.

Sistemi korozyondan korumak için tek bir ya da birkaç galvanik anot yetmeyebilir. Bu durum tamamen korunacak yapının büyüklüğüne ve akım ihtiyacına bağlı olarak değişecektir. Bu durum da ise belirlenen belli başlı noktalara koruma için yetecek sayıda ve ölçüde galvanik anotların bağlanmasının sağlanmasıyla katodik koruma sistemi devreye alınmış ve sağlıklı bir koruma sağlanmış olacaktır. Galvanik anotların bağlanacağı yerler genellikle zemin özgül direncinin düşük olduğu yerler olmasına dikkat edilmeli ve anot çukuru denilen çukurlar açılarak bu çukurlara galvanik

anotlar yerleştirilmelidir. Anot çukurlarının içi ise özel dolgu malzemesi ile doldurulmalı galvanik anotların etrafı bu dolgu malzemeleri ile kaplanmalıdır. Bunu yapmaktaki esas amaç ise galvanik anodun elektriksel dayanımını düşürmek ve uniform olarak akım üretilmesini sağlamaktır. Bunun sayesinde galvanik anot bölgesel olarak azalmak yerine her bölgede eşit şekilde harcanır.

Galvanik anotların sisteme verdikleri akım kapasiteleri ve verimlilikleri bellidir. Katodik koruma sistem devresine sonsuz bir koruma sağlanmaz belirli bir süre sistemi korumaya yetecek kadar sayıda ve miktarda galvanik anotlar sisteme dahil edilerek korunan sistemin belirlenen süre boyunca sistem yüzeyini katot şeklinde tutar. Bu galvanik anotlar taşınabilir bir elektrik kaynağı tarzında oldukları için elektrik taşıma maliyetlerinin yüksek ölçüde olduğu veya elektrik hattı çekilmesinin zor olduğu bölgelerde akım kaynağı olarak kullanılarak sistemi korozyondan korur.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerindeki galvanik anotlar sistemin korozyondan korunması esnasında ayrışarak zaman içinde azalır bu sebepten dolayı galvanik anotlu sistemlerde anotların belirli zaman aralıkları ile yenilenmesi sistemin koruma işlevinin düzgün bir şekilde yerine getirilmesini sağlar. Sistem içerisinde kullanılacak olan anotların kesinlikle daha önceden kullanılmamış anotlar olması gerekmektedir.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bu koruma sisteminde dışarıdan alınacak herhangi bir akım kaynağına ihtiyaç olmayıp koruma için gereken akım galvanik anotların yardımı ile sağlanır. Fakat galvanik anotlardan alınan akımın maliyeti dışarıdan alınan akımın maliyetinden daha fazla olduğu için akım ihtiyacı yüksek olan boru hatlarında pek tercih edilen bir koruma sistemi değildir. 0,5-1,0 Amperden daha az akım ihtiyacına sahip olan boru hatlarında daha ekonomiktir.
- Devrede oluşan potansiyel küçük olduğu için, özgül elektriksel direnci yüksek olan toprak zeminlerde galvanik anotlu katodik koruma sisteminin uygulanması oldukça güç hal alır. 5000 Ohm.cm'den daha fazla özgül elektriksel dirence sahip toprak zeminlerde galvanik anotlu katodik koruma sisteminin uygulanmaması gerekmektedir.
- Uygulama şekli ve yapımı oldukça kolaydır. Sistemin yürütülmesi esnasında herhangi bir ayar yapılması gerekmez. En büyük dezavantajı ise sistem boyunca

uygulanmış olan galvanik anotların bakım ve kontrolü oldukça güçtür. Herhangi bir arıza oluşup oluşmadığının ortaya çıkartılması için her bir anodun teker teker kontrol edilmesi gerekmektedir.

- Galvanik anotlardan sisteme katılan akımı kontrol etmek imkânsızdır. Boru hattı sisteminin ihtiyaç duyduğu akım polarizasyon dolayısıyla zaman içerisinde azalmaya başlar. Gerçekleşen bu durumda devre potansiyelinde de azalma görüleceğinden dolayı anottan sistemin ihtiyaç duyup aldığı akım kendi kendine azalır.
- Anot ile zemin potansiyeli az olduğundan, anot yatağının çevredeki diğer metalik sistemler üzerinde oluşturduğu enterferans etkisi dikkate alınmaz.
- Anot kısmının yakınında bulunan borunun yüzey alanında oluşan yüksek gerilimden dolayı borunun kaplamasında herhangi bir açılma durumu gerçekleşmez.

#### 2.4.2.1. Galvanik anot çeşitleri

Galvanik anotlar sisteme akım gönderdikçe kütlelerinde kayıplar gerçekleşir. Gerçekleşen bu kayıplar nedeni ile iyi bir anotta aranan özelliklerin aşağıda belirtilen niteliklerdeki gibi olması beklenir (İller Bankası, 2005).

- Uygulama alanı korozif ortamlar olduğundan dolayı korozyona karşı olan direncinin yüksek olması,
- Bünyelerinde barındırdıkları akım kapasitelerinin en yüksek seviyede olması,
- Kendi polarizasyonlarının düşük oranda gerçekleşmesi.

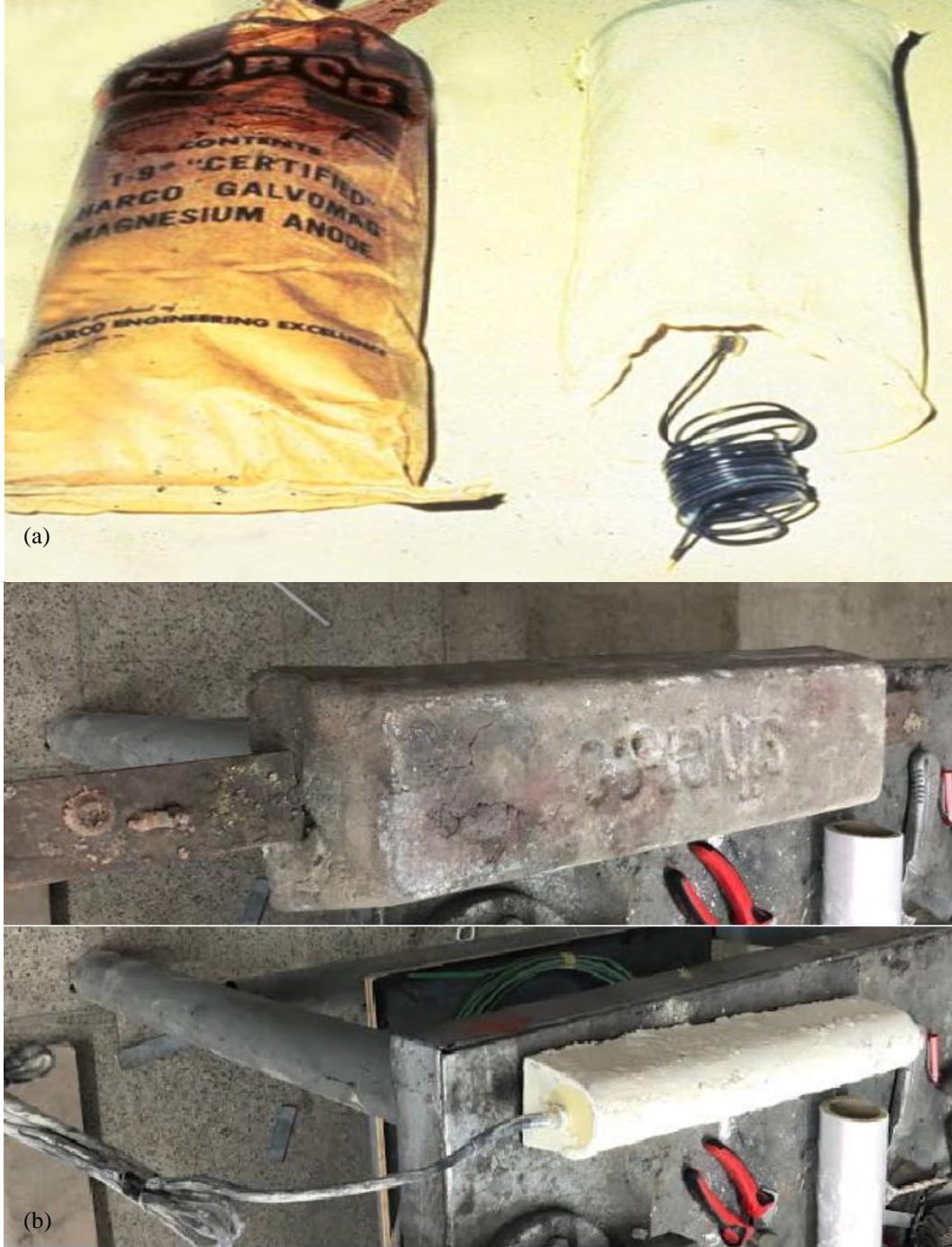
Galvanik anot olarak çoğunlukla magnezyum, alüminyum, çinko ve bunların alaşımları katodik koruma sistemlerinde kullanılır. Toprak altı boru hatlarında veya metalik sistemlerde genel olarak galvanik anot olarak magnezyum kullanılırken, deniz altında kalan boru hatlarında ya da metalik sistemlerde ise galvanik anot olarak çinko kullanılabilir.

Magnezyum, alüminyum ve çinko anotların özgül direnç açısından kullanma sınırları Tablo 2.5'te verilmiştir.

**Tablo 2.5** Galvanik anotların özgül dirence göre kullanım sınırları (İller Bankası, 2005)

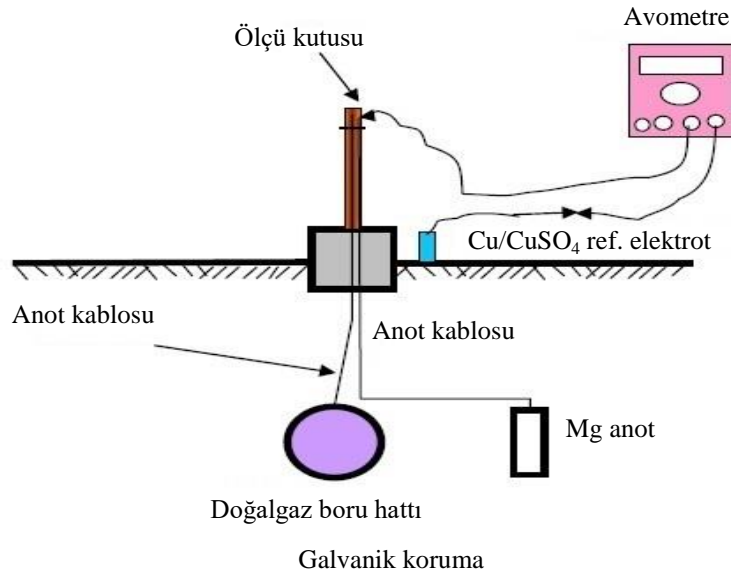
Kullanılabileceği Maksimum Özgül Direnç Değeri	Galvanik Anot
10000 Ohm.cm	Yüksek Potansiyelli Magnezyum
6000 Ohm.cm	Az-63 Magnezyum
2000 Ohm.cm	Alüminyum
1000 Ohm.cm	Çinko

Magnezyum (Mg) anotlar: Akaryakıt, su, atık su, doğalgaz boru hatları ve LPG tanklarında katodik koruma işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan galvanik anot çeşitidir. Galvanik anot türleri arasında geniş kullanım yelpazesine magnezyum anotlar sahiptir. Mg anot çeşitleri Şekil 2.48’de gösterilmiştir.



Şekil 2.48 Magnezyum anotların çeşitleri (a) torba tipi Mg anot (b) D tipi H.pot Mg anot

Magnezyum anot ile yapılan bir katodik koruma uygulaması sistem şeması Şekil 2.49’da gösterilmiştir.



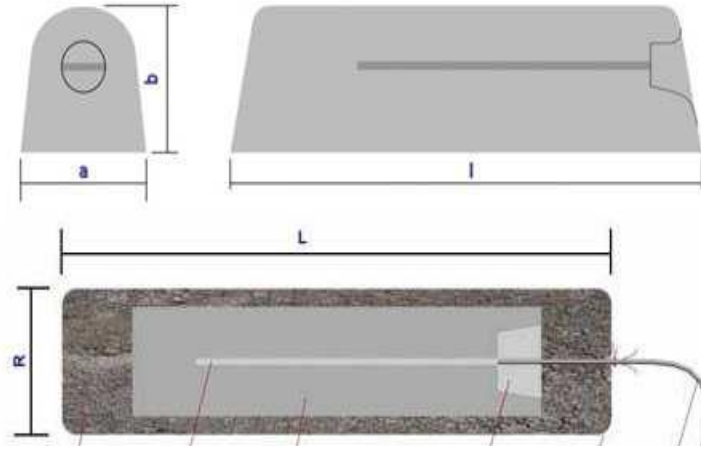
**Şekil 2.49** Toprakaltı sistem için magnezyum anotlu galvanik katodik koruma mekanizması

Saf halde bulunan bir magnezyum anodunun sahip olduğu standart potansiyeli -2,4 V'dur, doymun bulunan bakır/bakır sülfat referans elektrotuna göre sahip olduğu potansiyeli -1,55 V dur. Magnezyum anot içine düşük oranda mangan elementi karıştırılır ise elde edilen potansiyel -1,75 V negatif yönde arttırmak olasıdır. Yüksek bir potansiyele sahip olan bu magnezyum anotlar özgül direnci yüksek ve tatlı sularda kullanmak için tasarlanmıştır (İller Bankası, 2005). Galvanik anot çeşitleri arasında akım verimi en düşük olan çeşit magnezyum anotlardır. Anot yatağı çok uygun durumda olsa dahi magnezyum anotların verimi % 50-60 gibi düşük seviyelerde olur. Magnezyum anotların sahip oldukları elektrokimyasal özellikler aşağıdaki çizelgede açık bir şekilde gösterilmiştir (Tablo 2.6).

**Tablo 2.6** Magnezyum anotların sahip oldukları elektrokimyasal özellikler (Esenmetal.com, 2012)

ÖZELLİK	YÜKSEK POTANSİYELLİ MAGNEZYUM ANOTLAR	AZ-63 TİP MAGNEZYUM ANOT
Yoğunluk	1.78 g/cm <sup>3</sup>	1.86 g/cm <sup>3</sup>
Çeliğe Karşı Devre Potansiyeli	750 - 950 mV	650 - 750 mV
Elektrot Potansiyeli (Cu/CuSO <sub>4</sub> 'a göre)	1650 - 1750 mV	1450 - 1650 mV
Gerçek Akım Kapasitesi	1100 A.saat/kg 7,88 kg/A.yıl	1210 A.saat/kg 7,16 kg/A.yıl
Anot Akım Verimi (Minimum)	% 50	% 50
Teorik Akım Kapasitesi	2200 A.saat/kg, 4 kg/A.yıl	2200 A.saat/kg, 4 kg/A.yıl

Magnezyum anotların ağırlık ölçüleri genellikle libre (lb) şeklinde ifade edilir ve 1 lb 0,455 kilograma eşit bir değerdir.



Şekil 2.50 D profilli magnezyum anot gösterimi

Şekil 2.50’de gösterilen yüksek potansiyelli ve AZ-63 tip magnezyum anotlara ait boyut ölçüleri Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da ki gibidir. Magnezyum anotların ölçülendirilmesinde Tablo 2.7’de ki Türk Standardı olsa da çoğunlukla NACE Standardı ölçülendirmek için kullanılır. Tablo 2.8 ve Tablo 2.9 değerleri NACE standardına göre hazırlanmıştır.

Tablo 2.7 Türk Standardındaki magnezyum anot ölçüleri (TS 9234, 1991)

Anot Tipi	ANOT AĞIRLIĞI		ANOT BOYUTLARI (mm)	
	Çıplak	Dolgulu	Çıplak	Dolgulu
	kg	kg	a x b x l	R x L
M-1	1,6	12,6	30 x 30 x 970	130 x 1100
M-2	3	12,0	60 x 60 x 470	160 x 550
M-3	5	14,5	100 x 100 x 300	200 x 400
M-4	8	19,5	100 x 100 x 460	200 x 550
M-5	10	24,0	100 x 100 x 560	200 x 650
M-6	15	32,0	130 x 130 x 500	225 x 600
M-7	17	36,0	130 x 130 x 580	225 x 700
M-8	20	41,0	130 x 130 x 700	225 x 800

Çıplak anot kütlelerinde tolerans % 5, Uzunluk ölçülerinde tolerans % 3’dür

**Tablo 2.8** NACE Standardında ki AZ-63 tipi magnezyum anodunun ölçüleri (Yalçın ve Koç, 1999)

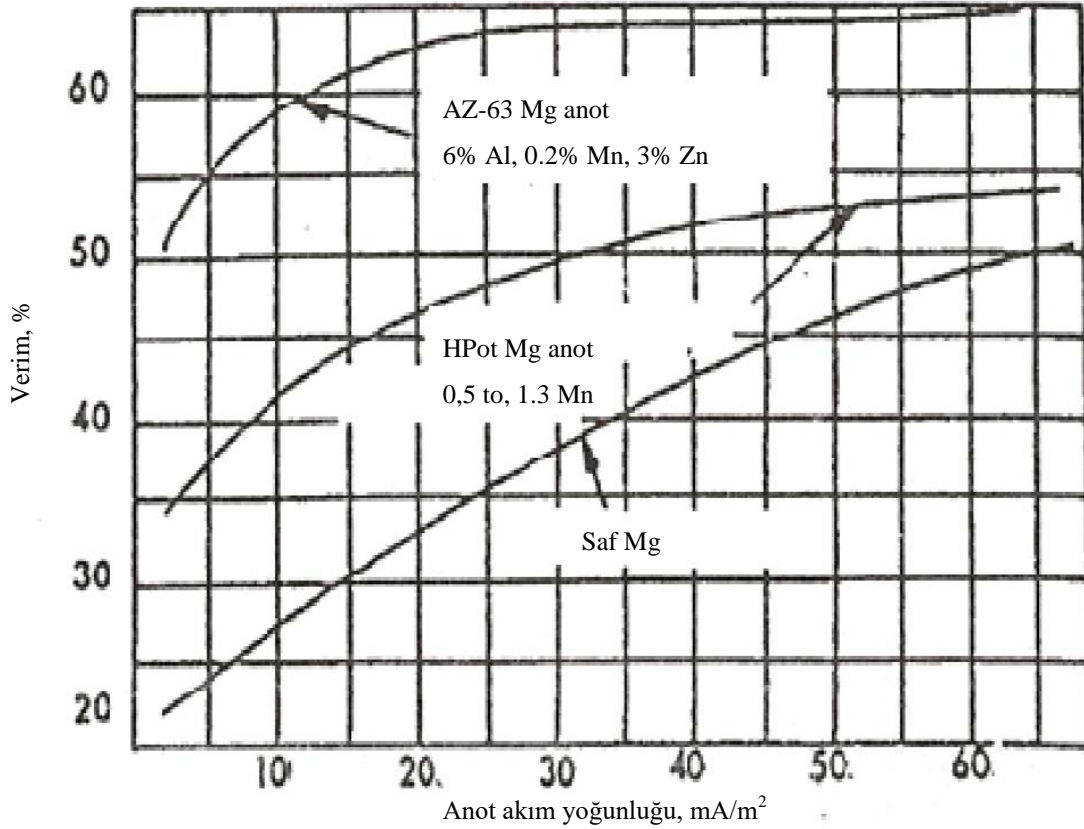
ANOT AĞIRLIĞI				ANOT BOYUTLARI (mm)	
Çıplak		Dolgulu		Çıplak	Dolgulu
lb	kg	lb	kg	a x b x l	R x L
3	1,359	8	3,63	75 x 75 x 125	130 x 200
5	2,265	13	5,90	75 x 75 x 200	130 x 280
9	4,077	27	12,2	75 x 75 x 350	130 x 500
12	5,436	32	14,5	100 x 100 x 300	190 x 450
17	7,701	45	20,4	100 x 100 x 425	190 x 600
32	14,496	68	30,8	125 x 125 x 500	210 x 700
50	22,750	100	45,4	175 x 175 x 400	250 x 600

**Tablo 2.9** NACE standartlarına göre yüksek potansiyele sahip Mg anotların ölçüleri (Yalçın ve Koç, 1999)

ANOT AĞIRLIĞI				ANOT BOYUTLARI (mm)	
Çıplak		Dolgulu		Çıplak	Dolgulu
lb	kg	lb	kg	a x b x l	R x L
3	1,359	12	5,4	94 x 94 x 125	150 x 250
5	2,265	17	7,7	94 x 94 x 125	150 x 300
9	4,077	35	16	68 x 68 x 650	150 x 775
9	4,077	26	12	94 x 94 x 330	150 x 425
12	5,436	35	16	94 x 94 x 450	150 x 575
14	6,370	42	19	94 x 94 x 525	160 x 650
17	7,701	59	27	68 x 68 x 1250	150 x 1375
17	7,701	44	20	94 x 94 x 650	160 x 725
20	14,496	70	32	62,5 x 62,5 x 1480	125 x 1650
32	14,560	75	34	137,5 x 137,5 x 525	200 x 700
48	21,840	99	45	137,5 x 137,5 x 750	200 x 950



Yüksek potansiyele sahip anotların verimlilikleri AZ-63 tip magnezyum anotlarından daha düşük seviyelerdedir. Magnezyum anotlarda anot bölgesinden sisteme giden akım şiddeti yükseldikçe akımın verimi de yüksek seviyelere ulaşmış olacaktır. Aşağıdaki grafikte magnezyum anotların sahip oldukları akım verimlilikleri akım yoğunluklarına göre değişimi grafikteki eğriler yardımı ile Şekil 2.51’de belirtilmiştir (Yalçın ve Koç, 1999).



Şekil 2.51 Magnezyum anotlardaki akım verimliliğinin akım yoğunluğuna göre değişme grafiği

Çinko (Zn) anotlar: Galvanik anot cinslerinden çinko anotlar korozif ortamın özgül direncinin 1000 Ohm.cm’ den daha az olan tuzlu su, tatlı su ve toprak zemin içindeki demir ve çelik boru yapılarının katodik koruması yapılırken bu galvanik anot cinsi kullanılabilir (İller Bankası, 2005).

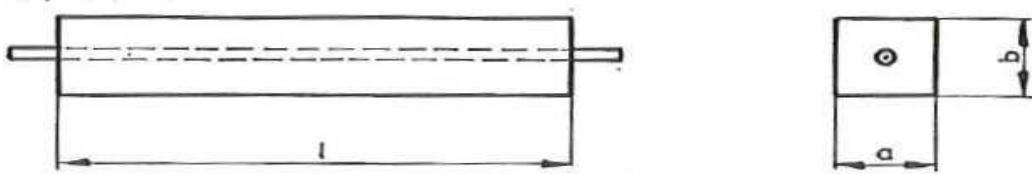
Çinko anotların genelde 2 çeşit şeklinde üretimi gerçekleştirilir. ASTM-B418 Tip I ve ASTM-B418 Tip II standartlarına uygun bir şekilde üretiminin gerçekleştirilmesi yapılır (Tablo 2.10). Tip I çamur ve deniz suyu gibi korozif çevrede, tatlı su ve toprak gibi korozif çevrelerde ise Tip II alaşımı kullanılabilir (Esenmetal.com, 2012).

Zemini toprak olan alanlarda kullanabilecek olan çinko anotlar ortamın özgül direncini azaltmak ve anodun her bölgeye eşit bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla %25 jips, %50 bentonit, %25 sodyum sülfat ile karıştırılarak bez torbalara katılarak paket haline getirilir

**Tablo 2.10** Çinko anotların elektrokimyasal özelliklerini gösteren tablo (Esenmetal.com, 2012)

ÖZELLİK	ASTM-B418 Tip I	ASTM-B418 Tip II
<b>Teorik Akım Kapasitesi</b>	820 A.saat/kg 10,66 kg/A.yıl	820 A.saat/kg 10,66 kg/A.yıl
<b>Anot Akım Verimi (Minimum)</b>	% 95	% 90
<b>Gerçek Akım Kapasitesi</b>	780 A.saat/kg 11,22 kg/A.yıl	740 A.saat/kg 11,84 kg/A.yıl
<b>Elektrot Potansiyeli ( Cu/CuSO<sub>4</sub>' a göre)</b>	1100 mV	1100 mV
<b>Çeliğe Karşı Devre Potansiyeli</b>	250 mV	250 mV
<b>Yoğunluk</b>	7.13 g/cm <sup>3</sup>	7.14 g/cm <sup>3</sup>

Tablo 2.11 ve Tablo 2.12’de sırasıyla zemin ve deniz içerisinde kullanıma uygun olan TS 9234 standardına sahip çinko anotların sahip olduğu ölçülere yer verilmiştir (Yalçın ve Koç, 1999). Şekil 2.52 ve Şekil 2.53’te de sırasıyla zemin ve deniz içerisinde kullanıma uygun olan çinko anotlar gösterilmiştir.



**Şekil 2.52** Zemin altında kalan çinko anot profili

**Tablo 2.11** Zemin içerisinde kullanıma uygun olan çinko anotların ölçüleri

Anot Tipi	a (mm)	b (mm)	l (mm)	Anot Kütlesi (kg)
ÇZ-1	35	35	1020	9
ÇZ-2	35	35	1520	13
ÇZ-3	51	51	1220	22
ÇZ-4	60	60	1220	32
ÇZ-5	102	102	915	67
ÇZ-6	10	18	Şerit anot	0,35 kg/m
Anot kütlesinde tolerans % 5, Uzunluk ölçülerinde tolerans % 3'dür				



Alüminyum (Al) anotlar: Alüminyum anotlar özgül direnci 2000 Ohm.cm den daha az olan deniz suyu veya Cl iyonu ihtiva eden ortamlardaki demir ve çelik boru sistemlerinin katodik olarak korunması için kullanılırlar (İller Bankası, 2005).

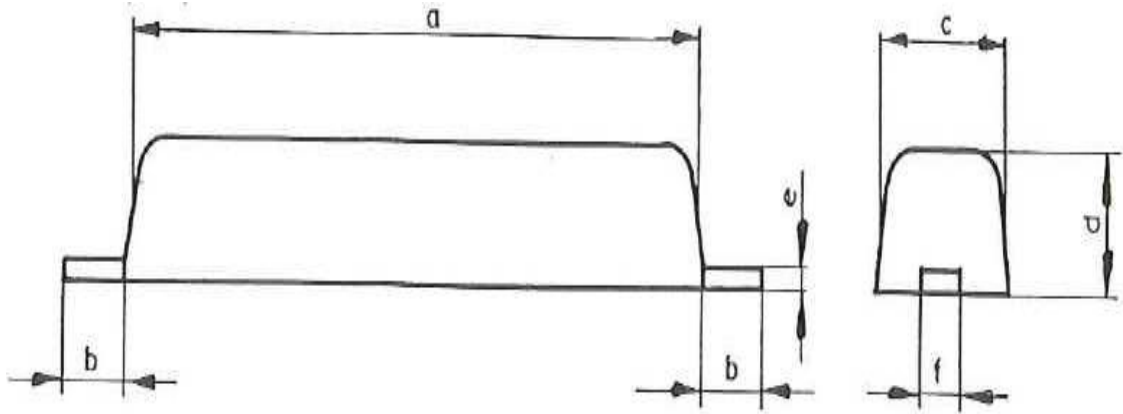
Galvanik anot tiplerinden olan bu alüminyum içeren anotlar yalnızca zeminin özgül direncinin az olduğu tuzlu sıvılarda veya deniz suyu gibi ortamlarda kullanılır.

Tablo 2.13'te Al anotların elektrokimyasal özelliklerine yer verilmiştir.

**Tablo 2.13** Alüminyum galvanik anotların sahip oldukları elektrokimyasal özellikler (Yalçın ve Koç, 1999).

ÖZELLİK	ALÜMİNYUM ANOT
Teorik Akım Kapasitesi	2970 A.saat/kg 3,16 kg/A.yıl
Anot Akım Verimi (Minimum)	% 90
Gerçek Akım Kapasitesi	2670 A.saat/kg 3,50 kg/A.yıl
Elektrot Potansiyeli (Cu/CuSO <sub>4</sub> 'a göre)	1100 mV
Çeliğe Karşı Devre Potansiyeli	250 mV
Yoğunluk	2.70 g/cm <sup>3</sup>

Şekil 2.54'te Alüminyum anotların profili gösterilmektedir. Tablo 2.14'te de aşağıdaki anot profilinin ölçüleri verilmiştir.



**Şekil 2.54** Alüminyum anot profili

**Tablo 2.14** Türk standartlarına göre deniz suyu içinde kalan boru hatları için alüminyum anotların boyutları (TS 9234, 1991)

Anot Tipi	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	Anot Kütlesi (kg)	
							Brüt	Net
AL-1	380	50	117	33	6	40	3,8	4,8
AL-2	380	50	117	53	6	40	6,5	7,5
AL-3	380	50	117	64	6	40	7,7	8,7
AL-4	265	50	178	65	6	25	8,0	9,0
AL-5	380	50	117	74	6	40	9,0	10,0
AL-6	380	50	117	79	6	40	9,6	10,6
AL-7	420	50	211	45	6	50	9,6	10,6
AL-8	360	70	254	60	6	25	13,5	14,5
AL-9	168	70	295	120	6	25	13,5	14,5
AL-10	219	70	280	102	6	25	13,5	14,5
AL-11	380	70	117	113	6	40	13,5	15,3
AL-12	380	70	117	123	6	40	15,0	16,0
AL-13	380	75	117	139	6	40	17,0	18,0
AL-14	765	75	112	115	12	40	26,5	30,0
AL-15	738	75	112	115	12	40	31,2	34,9
AL-16	1165	75	112	115	12	40	41,0	45,0
AL-17	760	100	160	150	12	50	43,0	51,0
AL-18	500	115	190	205	10	50	43,0	53,0
AL-19	2275	200	178	100	10	65	105,0	119,0
AL-20	2240	370	165	160	10	60	147,0	163,0

Anot kütlesinde tolerans % 5, Uzunluk ölçülerinde tolerans % 3'dür

Galvanik anotların boy/çap oranı yükseldikçe korozyona uğrama karşısında dayanımı düşüp anot ağırlığı düşeceğinden, sahip olduğu elektrik özgül direnci fazla olan alanlarda, aynı miktarda lakin daha fazla boyu uzun anotlar kullanılması uygundur. Toprağın sahip olduğu elektrik özgül dayanımına göre kullanılabilir durumda olan anot kütleleri aşağıdaki Tablo 2.15'te belirtilmiştir (Yalçın ve Koç, 1999).

**Tablo 2.15** Toprağın sahip olduğu elektrik özgül direncine göre kullanılabilir anot kütleleri

Zemin Elektrik Özgül Direnci ( $\rho$ ) (ohm x cm)	Anot Kütleleri (kg)
$\rho < 500$	15-20
$500 < \rho < 1000$	10-15
$1000 < \rho < 2500$	5-10
$2500 < \rho < 3500$	1,6-5

#### 2.4.2.2. Galvanik anotların yataklarının hazırlanması ve uygulaması

Galvanik anotlar direkt olarak zeminin içerisine gömülmeyp, galvanik anodun iyon verme direncini düşürmek ve anodun her bölgesinde eşit düzeyde en fazla akımın korunacak olan boruya iletimini sağlayabilecek bir anot dolgusu içine gömülmesi gerekir. Magnezyum ve çinko türü galvanik anotların anot yatağına doldurulması gereken dolgu maddesi bentonitin içerisine alçı ve sodyum sülfat eklenerek imal edilir. Alçının buradaki asıl işlevi çözeltilerin içerisine sülfat iyonları salarak anodun yüzeyindeki oluşabilecek olan hidroksit film tabakasının önüne geçmektir. Alçı taşı suyla teması ile yaklaşık 2 g/L değerinde ayrışır. Bu durum sayesinde galvanik anot bölgesinde de özgül direncin azalması sağlanır. Sodyum sülfatın korozif ortamdaki ayrışması oldukça fazla olup anot yatağı içerisine sodyum sülfat eklenerek anot yatağının sahip olduğu özgül direnci 100 Ohm.cm'nin de altına inebilir. Bentonit malzemesinin bünyesinde su barındırıp hapsetme kapasitesi fazla olup anot yatağının devamlı olarak nemli olarak bulunmasına yardımcı olur (Üneri, 2000).

Çinko ve magnezyum tipi galvanik anotların anot yatağında kullanılacak olan dolgunun bileşikleri aşağıda belirtilen Tablo 2.16'da gösterilmektedir (TS 5141, 1987).

**Tablo 2.16** Galvanik anot yataklarının doldurulmasında kullanılan dolgu maddeleri

Bileşenler	Tip A	Tip B
Jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Alçı)	% 70 – 75	% 25 – 30
Bentonit	% 20 – 25	% 40 – 50
Sodyum Sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	% 5 – 10	% 25 – 30
Özgül Elektrik Direnci	50–100 Ohm.cm	25–50 Ohm.cm

Tip B galvanik dolgusu çinko anotları için kullanıma elverişli olan dolgu tipi iken, Tip A galvanik anot dolgusu ise magnezyum anotlar için uygun bir dolgu tipidir. Toprak altında kullanılan metal veya çelik boru hatlarında galvanik anotlu katodik korunmasının uygulanmasında sıklıkla magnezyum anotların anot yataklarının dolgu malzemesi olarak % 70 alçı, % 25 Bentonit ve % 5 Sodyum Sülfat karışımları kullanılarak dolgu tamamlanır. Sodyum sülfatın dolgu karışımı içerisinde sahip olduğu oran zeminin özgül direncinin yükselmesine bağlı bir şekilde % 15 ile % 20 değerlerine kadar arttırılabilmektedir. Galvanik anot yataklarına dolgu malzemesi ilavesi ile anot yatağının özgül direncinin 50 ile 100 Ohm.cm değerine kadar indirmesi beklenir (İller Bankası, 2005).

Galvanik anotların anot yatağının içerisine gömülmesinin avantajları aşağıda incelenmiştir (Üneri, 2000).

- Anot yatağı kullanılması sayesinde galvanik anotların daha fazla oranda özgül dirence sahip zeminlerde kullanılması sağlanır.
- Galvanik anot yatağı içine gömülen anotlar genellikle bütün bölgesi eşit şekilde tükenir. Böylece anodun kullanım ömrü uzar.
- Anot yatağı, içerisinde gömülü olarak bulunan galvanik anodun etrafının devamlı olarak rutubetli kalarak anot direncinin düşürülüp akım çıkışının artması sağlanır.

#### **2.4.2.3. Galvanik anot çeşidi belirleme kriterleri**

Galvanik anotla boru hatlarının korozyondan koruma sistemlerinde çinko, magnezyum veya alüminyum anotlardan hangilerinin seçileceği sistem için ve maliyet

açısından hangisinin daha uygun olacağını belirlenmesi aşağıdaki madde madde belirtilmiş kıstaslara bağlı olarak değişkenlik gösterir.

- Toprak altında kalan boru hatlarında katodik koruma alüminyum anotlar ile sağlanmaz.
- Akım verimliliği ve maliye açısından çinko anot kullanımı tercih sebebi olabilir, yüksek akım verimliliğine ve ucuz maliyetlere sahip olan çinko anotlar bunun yanı sıra düşük oranda potansiyele sahiptirler. Bunlardan dolayı genellikle düşük özgül direnç sahibi toprak zeminlerde ve deniz suları içerisinde kullanıma uygundur.
- Özgül direncin fazla olduğu zeminlerde ve tatlı su içerisinde magnezyum anot kullanılır.
- 3000 Ohm.cm den daha fazla seviyede özgül dirence sahip olan toprak zeminlerde çinko anot, 5000 Ohm.cm den de fazla özgül dirençli toprak zeminlerde ise mg anot kullanılması durumunda anot akım çıkışı tarafında azalma olurken bu sebepten dolayı da akım verimliliği de düşmektedir.
- Çinko anotların fiyatları daha ucuz ve magnezyum anotlara göre anot verimlilikleri daha fazladır. Buna rağmen çinko anotlar düşük potansiyele sahip olduklarından dolayı yalnızca özgül direnci çok az olan toprak zeminlerde ve tuzlu su içerisinde koruma yapılırken kullanıma uygun olur.
- Çinko anotlardan sistemin aldığı akım aynı koşullar uygulandığında magnezyum anotlara göre daha düşüktür.
- Çinko anotların sayesinde sistemin sahip olduğu potansiyelin en fazla -1 Volt değerine doğru getirmeye imkân bulunurken bu değere ulaştıktan sonra şiddeti giderek azalan akım dolayısıyla hiçbir zaman çinko anotlar ile aşırıya kaçan bir katodik koruma elde edilmemiş olur.
- Boru/zemin potansiyelini olabileceğinden daha fazla değerlere çıkartarak koruma magnezyum anotlar ile sağlanır.
- Magnezyum anotların aynı ölçülere sahip olduğu çinko anotlardan kullanım ömrü daha düşüktür. Kullanım ömrü açısından katodik koruma sistemlerinde çinko anot kullanımı mantıklı olur.
- Galvanik anotlardan boru hattı sistemlerinin korunmak için aldığı akımın şiddeti, anot-katot arasında gerçekleşen potansiyel farklar ile anodun akım karşısındaki özgül direncine bağlı olarak değişiklik gösterir. Galvanik anotların

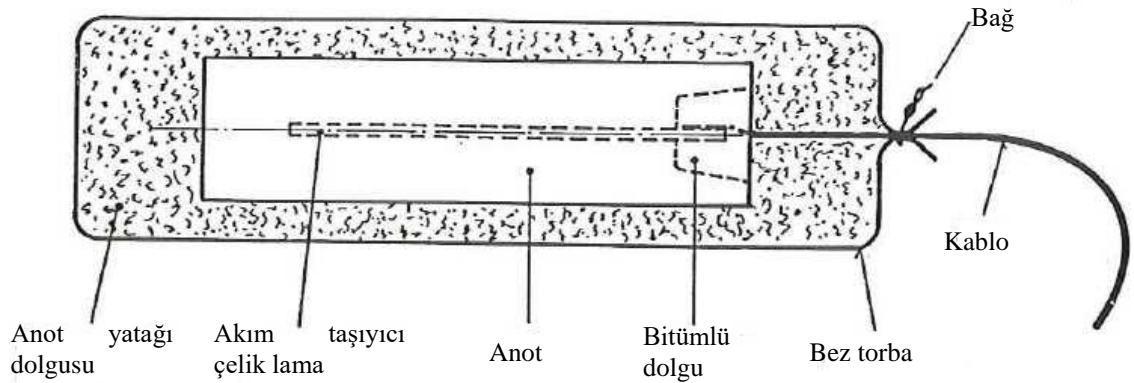


akımlara karşı göstermiş olduğu direnç ne kadar az olursa anottan alınan akımın şiddeti de o denli fazla olur. Böyle bir durumda galvanik anodun anot yatağı içerisindeki yüzey alanı ne kadar artırılır ise anot o denli üniform olarak harcanır ve anotta akım çıkışı yükseltilebilir, örneğin bir değil de iki ya da üç belki de daha fazla anot kullanmak anot yüzey alanını artırır. Yani bu durumdan anlaşılması gereken durum şudur; özgül direnci yüksek olan toprak zeminlerde küçük ölçülerde fazlaca anot kullanmak daha iyidir.

- Galvanik anot seçimlerinde en önemli faktör ise maliyettir. Maliyeti en düşük olan anot ise alüminyum anotlardır. Fakat alüminyum anotları toprak içerisinde kullanmak imkân dâhilinde değildir. Alüminyum haricinde çinko da ucuzdur tercih edilebilir ondan sonra ise magnezyum anotlardır.

#### 2.4.2.4. Galvanik anotların montajı

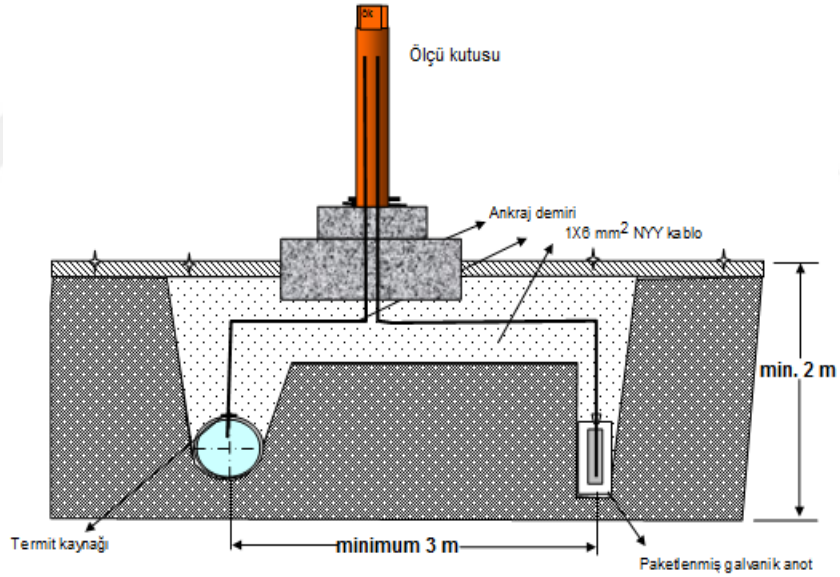
Toprağın özgül direncinin çok fazla değişiklik göstermediği zeminlerde katodik koruma için kullanılacak olan galvanik anotlar boru hattı paralelinde eşit aralıklar uygulanarak döşenir. Toprağın özgül direncinin ani inişli çıkışlı olduğu toprak zeminlerde özgül direncin en alçak seviyede olduğu yerlere yerleştirilir. Özgül direncin düşük olduğu bu kısımlar galvanik anotların en verimli işlevini yürütebileceği yerler olup katodik korunan boru hattının ihtiyaç duyduğu akımın en fazla olduğu yerlerdir (TS 5141, 1987).



Şekil 2.55 Paket halinde bulunan bir galvanik anodun şeması

Montaj aşamasında Şekil 2.55'te ki gibi paket halinde bulunan galvanik anotların yerleştirilmesi sırasında belli başlı uyulacak kurallar vardır. Bu kuralları aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz;

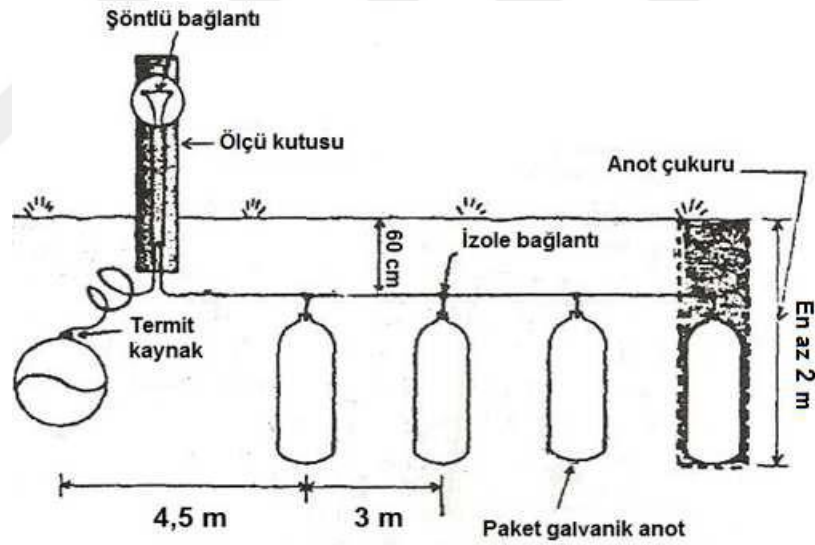
- Galvanik anotlar korunması sağlanacak olan boru hattının en az elektrik direnci gerçekleşecek şekilde şekil de termit adı verilen kaynak cinsi ile boru ile birleştirilir.
- Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde galvanik anot boru hattına bağlanılacağı yerde direkt olarak ölçü kutusu koyulması gerekmektedir. Ölçü kutusu konulmayan galvanik anotların kontrolleri aşırı derecede zorlaşır kontrol maliyetleri yükselir.
- Katodik olarak korunacak olan boru hattı ile katodik koruma elemanı olan galvanik anot arasındaki bağlantıyı sağlayan kabloların TS 212 standardına bağlı olarak NYY tipi elektrolitik bakır malzemeden üretilmiş ve fazla sayıda veya tek damarlı minimum  $6 \text{ mm}^2$  kesite sahip olması gerekmektedir.
- Galvanik anotlar korozyondan korunacak boru hattından Şekil 2.56'da görüldüğü gibi en az 3 metre uzaklığa ve zeminden minimum 2 metre derine gömülmesi gerekmektedir (TS 5141, 1987).



Şekil 2.56 Katodik koruma sistemlerinde galvanik anotların yerleşim durumu

- Aynı zamanda galvanik anot boru seviyesinden minimum 1 metre aşağısına eğer zemin kuru ise ıslak bölge bulana kadar aşağına inilmesi gerekmektedir (Yalçın ve Koç, 1999).
- Anotlar yataklarına itina ile gömülmeli ve gömme esnasında herhangi bir zarara uğraması önlenmelidir. İzolasyonu zarar görmüş bağlantı kablolarının ise değişimi sağlanmalıdır.

- Galvanik anot torbalarında herhangi bir zarar görme yani delik veya zedelenme olmamalıdır. Torbalar su geçirgenliğine sahip olmalıdır.
- Galvanik anotların paket halinde depolanması esnasında kuru halde olması gerekmektedir. Galvanik anotların anot yataklarına gömülmesinden en az 48 saat önceden suya yatırılarak anot içindeki dolgu malzemesinin suyu tutması gerekmektedir (İller Bankası, 2005).
- Galvanik anotların boru ile bağlantısı termit denilen kaynak türü ile gerçekleştirilip bu kaynak noktasının çevresi izole hale getirilmelidir. Anodun montajının gerçekleştirileceği anot çukura ise su dökülüp üzerinin kapatılıp galvanik anodun nemlenmesi sağlanıp kısa bir süre içerisinde borunun anot tarafından polarize edilmesi sağlanmalıdır.
- Anotların birbirlerine seri bir şekilde bağlanması gerekiyorsa yani sistem bunu gerektiriyor ise galvanik anotlar paralel bağlandıktan sonra ana bir kabloda birleştirilir ve ölçü kutusuna bağlanarak katodik koruma sağlanacak olan sistem ile teması sağlanır.

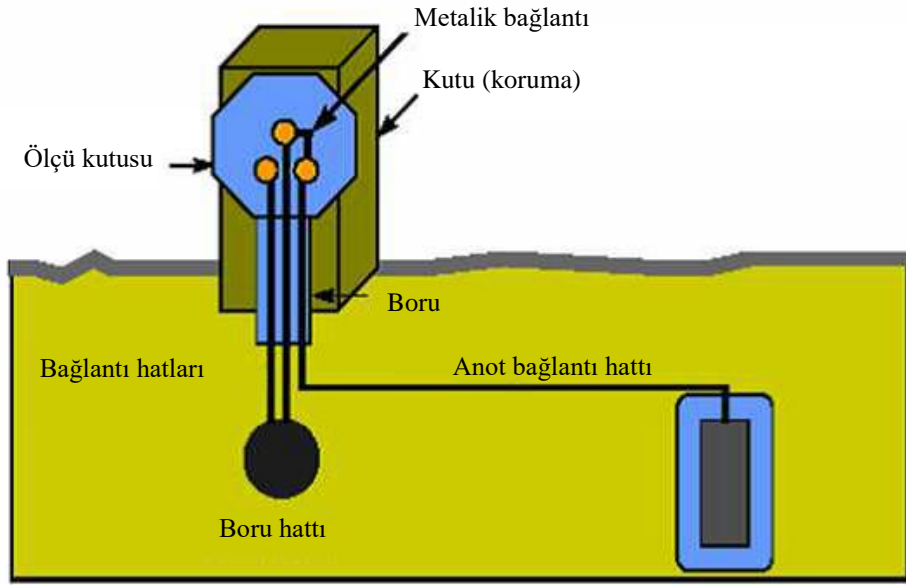


**Şekil 2.57** Paralel bağlantı şekli ile sistemin ihtiyaç duyduğu sayıda galvanik anotların birbirleri ile bağlantı şeması

- Galvanik anotlar toprakaltına Şekil 2.57’de ki gibi paralel ve dikey bir şekilde yerleştirilebildiği gibi yatay şekilde de gömülebilir. Boru hattına paralel ya da dikey konuma yaklaşık olarak minimum 10 cm kalınlıkta taban kısma yerleştirilir. Daha sonra ise anotlar eşit aralıklar ve standartlara uygun olarak bu çukurlara yerleştirilir ve anotların kabloları ana kabloya bağlanır. Galvanik

anodun dolgu malzemesinin diğer yarısı ise anotların üst kısımlarına doldurulur ve en son kalan üst kısım doğal toprak ile kapatılır (Yalçın ve Koç, 1999).

- Galvanik anotların katodik koruma sistemi sırasında çıplak bir şekilde sisteme bağlanması durumunda anot yatağı içerisine anot yatağı malzemesinin 3/1 i dökülmeli ve galvanik anot ortali bir şekilde yerleştirildikten sonra anot yatağı malzemesi ile etrafı kapatılarak iyice anodun etrafından sıkıştırılması sağlanmalıdır.
- Toprak altında kalan boru hatlarında sistemin katodik olarak korozyondan korumak amacıyla galvanik anotlar ile katodik koruma sistemi kurulur ve bu sistemin kontrol edilebilirliği için her anot başına bir ölçüm istasyonu da kurulmalıdır. Ölçü istasyonları Şekil 2.58’de gösterildiği gibi toprağın üst kısmına yerleştirilip korunan boru ile galvanik anotlara bağlı bir şekilde bırakılıp her an ölçüme hazır bir durumda olmalıdır (Odabaşı, 2004).



Şekil 2.58 Toprak üstünde bulunan ölçüm istasyonu

- Katodik koruma sistemlerinden galvanik anotlu katodik koruma sisteminin düzgün olarak çalışıp çalışmadığını kontrol edebilmek amacı ile her bir galvanik anot parçası için ayrı ayrı bir ölçüm kutusu tesis edilmelidir. Ölçü kutuları katodik koruma sistemlerinde birçok farklı test de alabilmek amacı ile kurulmaktadır. Şekil 2.59’da örnek bir ölçü kutusuna yer verilmiştir.



Şekil 2.59 Ölçüm kutusu ve kutunun iç kısmı

#### 2.4.2.5. Galvanik anotların net kullanım ömürleri

Birim kütledeki birim zaman içerisinde galvanik anottan sistemin elde ettiği en yüksek seviyedeki akımın miktarına “teorik akım kapasitesi” adı verilir. Bu bahsedilen miktarın gösterim birimi ise miktar A.saatt/kg (veya kg/A.yıl) şeklinde olmaktadır. Bu hesaplama sayesinde sistemin ihtiyaç duyduğu akımın ne kadar miktarda galvanik anot ile sağlanacağı veya ne kadar süre anodun yeteceği belirlenir. Fakat uygulama esnasında galvanik anodun ömrünü etkileyen iki önemli etkenin dikkate alınması gerekmektedir. Bu etkenlerden başlıcası “anot akım verimi” olur. Anot akım verimi, galvanik anot içerisinde boru hattı sisteminin aldığı akımın değerinin faraday yasası ile hesaplanan akım değerine oranı olarak bilinir. Diğer bir etken ise galvanik anodun anot kullanma etkenidir. Galvanik anotlar kullanıldıkça kütlesinde kayıplar olur ve bununla birlikte yüzeylerinin alanları da azalır. Bu yüzden anodun direnci de aynı oranda yükselir. Başka bir açıdan da bakılırsa anodun harcanma olayı hiçbir zaman her yüzeyde eşit olarak devam etmez ve galvanik anotta hiçbir şekilde sonuna kadar tükenene kadar kullanılamaz. Teorik olarak uygulama esnasında galvanik anodun kütlesinin maksimum yüzde 85 inin kullanılabileceği varsayılır. Bu etkenler ışığında galvanik anotların kullanım ömürleri bağıntı (2.11)’de verilen formül ile bulunur.

$$\text{Anot Ömrü} = \frac{\text{anot kütlesi(kg)} \times \text{anot verimi} \times \text{eskime faktörü}}{\text{akım şiddeti(A)} \times \text{teorik akım kapasitesi} \left( \frac{\text{kg}}{\text{A.yıl}} \right)} \quad (2.11)$$

- Teorik akım kapasitesi: 4 (kg/A.yıl) (Mg anot için)
- Eskime faktörü: 0,85 olarak hesaba katılır.

Galvanik anodu katodik koruma yöntemi ile korozyondan korunacak olan boru hatları galvanik anottan emdikleri akımla galvanik anotların kütlelerini kaybetmelerine sebep verirken galvanik anodu tamamen harcayana kadar bitiremez. Bunun nedeni ise galvanik anotların kütle olarak belirli bir seviyenin altına inmesiyle boru hatları için gerekli olan akımın ihtiyacını karşılayamayacak duruma düşer ve bu nedenden dolayı formülizasyon sırasında eskime faktörü yani harcanabilir kütle oranı %85 olarak hesaba katılır (Yalçın ve Koç, 1999).

#### 2.4.2.6. Galvanik anot yataklarının direnç hesaplaması

Toprakaltına yerleştirilmiş galvanik bir anodun direnci anodun çapı, boyu ile zeminin özgül direncine bağlı olarak değişir. Tek anodun sahip olduğu direnç anodun dik veya yatay olarak konumlandırılması durumuna bakılarak “Dwight Formülleri” ile hesaplanabilir. Bu dwight formülleri  $L/d > 5$  oranında olan silindir biçimine sahip galvanik anotların direnç hesaplamalarında kullanılmaktadır. Galvanik anotların en az anodun sahip olduğu boyu kadar derinlemesine anot yatağına yerleştirilmesi gerekmektedir. Çubuk şekline sahip olmayan lakin daire kesitinde bulunan galvanik anotların çap hesaplanmasında efektif çağ denilen ortalama çap değeri hesaplaması kullanılmaktadır (Yalçın ve Koç, 1999).

$$R_{\text{dikey}} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times \left( \ln \frac{8 \times L}{d} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (2.12)$$

$$R_{\text{yatay}} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times \left( \ln \frac{4 \times L}{d} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (2.13)$$

- $R_{\text{dikey}}$ : Dik gömülmüş galvanik anotların zemin direnci (Ohm)
- $R_{\text{yatay}}$ : Yatay gömülmüş galvanik anotların zemin direnci (Ohm)
- $\rho$ : Zemin elektrik özgül direnci (Ohm.cm)
- $d$ : Anot çapı (Anot yatağı dahil) (cm)
- $L$ : Anot uzunluğu (Anot yatağı dâhil) (cm)

$$R_{\text{iç}} = \frac{\rho^1}{2 \times \pi \times L^1} \times \left( \ln \frac{8 \times L^1}{d^1} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (2.14)$$

- $R_{iç}$ : Anot metalinden dolgu maddesinin geçiş direnci (Ohm)
- $\rho^1$ : Anot yatağı özgül direnci (Ohm.cm)
- $d^1$ : Anodun çapı (çıplak) (cm)
- $L^1$ : Anodun uzunluğu (çıplak) (cm)

$$R_T = R_{anot} + R_{iç} \text{ (Ohm)} \quad (2.15)$$

- $R_T$ : Anot yatağı toplam direnci (Ohm)

$$R_P = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L \times n} \times \left( \ln \frac{8 \times L}{d} - 1 + \frac{2 \times L}{L_{AA}} \ln(0.656 \times n) \right) \text{ Ohm} \quad (2.16)$$

- $R_P$ : Paralel gömülmüş dik galvanik anotların zemin direnci (Ohm)
- $s$ : Paralel anotlar arası mesafe (cm)
- $n$ : Paralel bağlanmış anot sayısı

#### 2.4.2.7. Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin sağladığı avantajlar

Herhangi bir dış kaynaktan alınacak akıma ihtiyaç duyulmaz. Sisteme gerekli olan akım anotlar yardımıyla sağlanır. Bu sistem herhangi bir elektrik kaynağının bulunmadığı bölgelerde tek çözümdür.

Sistemin kurulması kolaydır. İşletme yöntemi çok basittir herhangi bir ayar uygulanmasına gerek yoktur. Katodik korumanın uygulandığı bölgede bulunan diğer metalik yapılara herhangi akım etkisinde bulunmaz.

Anot-katot arasında oluşan potansiyel farkın ihtiyaç duyduğu akımı karşılayacak şekilde otomatik olarak sistem ayarı yapılır.

Anoda yakın olan borunun kaplamasında yüksek voltajlardan dolayı oluşan soyulmalar gerçekleşmez.

Kutupların ters bağlanması gibi herhangi bir tehlikeli durum oluşmaz.

#### 2.4.2.8. Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerindeki dezavantajlar

Bu sistemde ihtiyaç duyulan akımın kurulum maliyeti oldukça yüksek olmasından dolayı akım ihtiyacının fazla olduğu boru hatlarında kullanılmaz. Akım ihtiyacının 1 mA'den düşük olan boru hatlarında maliyeti düşük olacaktır.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde devrenin potansiyeli az olduğundan dolayı yüksek elektriksel özgül dirençli toprak zeminler içerisinde bu koruma istemini uygulamak zorlaşır. Bundan dolayı zemin özgül direncinin 4000-5000 Ohm.cm'den daha fazla olduğu toprak zeminlerde uygulanmaması gerekir.



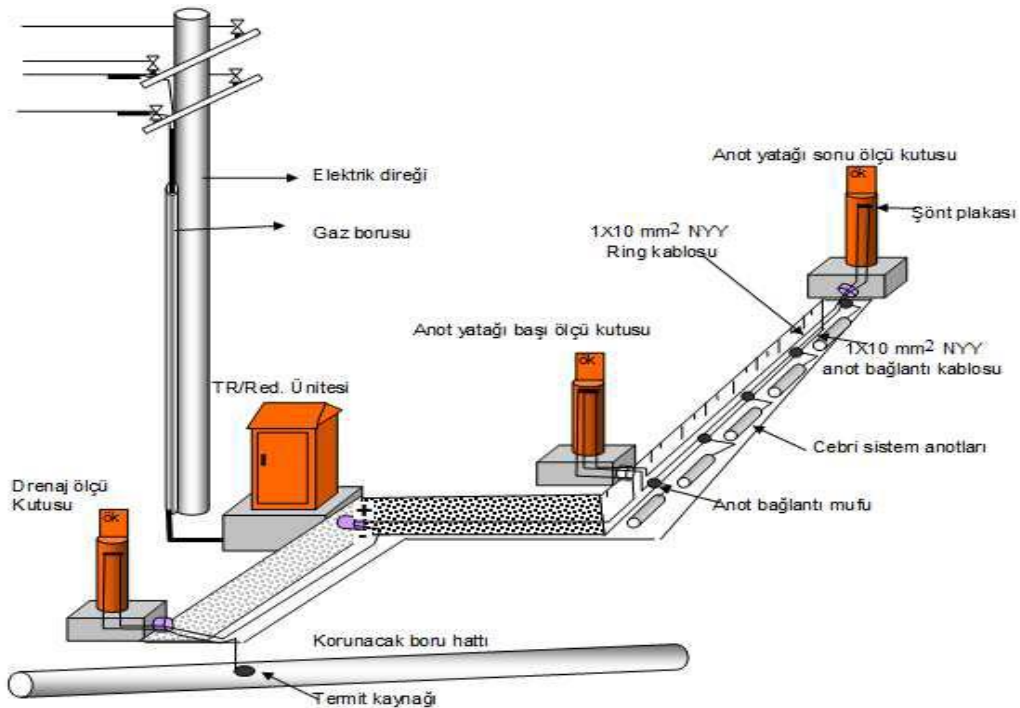
Sistemin işleyişi esnasında oluşabilecek bazı durumlarda katodik korumanın ihtiyaç duyduğu akım artarsa, sistemin içerisinde mevcut haldeki anotlarla bunu sağlamak mümkün değildir. Koruma sistemine yeni anotların eklenmesi gerekmektedir.

Sistemin işleyişi sırasında boru hattı boyunca dağılmış şekilde bulunan anotları kontrol altında tutmak zordur. Herhangi bir arıza durumunda her bir anodun teker teker kontrol edilmesi gerekmektedir.

### 2.4.3. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi

Boru hatlarını korozyondan korumak için uygulanan korozyondan koruma sisteminin dış bir elektrik kaynağına bağlanarak katot tepkimelerinin gerçekleşmesi sağlanıyor ise bu korozyondan koruma sistemine dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi denir. Bu şekilde anot tepkimesiyle elektron ortaya çıkmaz bunun sayesinde anot bölgede gerçekleşecek olan korozyon olayının önüne geçilmiş olur.

Sistem uygulamasında doğru akım kaynağından korunacak olan boru hattına verilen doğru akım ile boru hattı katot haline gelmesi sağlanır. Sisteme verilen bu doğru akımın genellikle herhangi bir şebekeden alınan alternatif akımın transformatör (redresör) ünitesinden geçirilmesi ile üretilmiş olur. Transformatör/Redresör ünitesinden çıkıp oluşan doğru akımın pozitif ucu anot yatağına, negatif ucu ise korozyonun etkilerinden korunacak boru hattına bağlanır (Yalçın ve Koç, 1999). Şekil 2.60'ta dış akım kaynaklı katodik koruma sistem mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.60 Dış akım kaynaklı katodik koruma sistem mekanizması



Elektrik kaynağından verilen akım anodun sahip olduğu potansiyeli açık devre potansiyeline dönüştürülmesiyle uygulanan katodik koruma olayında boru hattının tüm yüzeyi aynı potansiyele sahip olur ve korozyon oluşumu engellenir. Anodun açık devre potansiyelinin sistem ihtiyacından fazla olması durumunda boru hattı üzerine yapılan kaplamalara zararlı etkilerde bulunur. Sisteme katodik koruma uygulaması sırasında dış akım en düşük seviyeye yakın tutularak bu tür durumların oluşması engellenir bunun yanı sıra akım ihtiyaç olandan daha düşük tutulur ise korozyondan koruma başarılı sayılmaz etkileri kısmi görülür (İller Bankası, 2005).

#### **2.4.3.1. Yardımcı anotlar**

Katodik koruma sistemlerinde sadece dış akımı boru hattına vermekle korozyondan koruma işlemi tam olarak yeterli olmaz. Dış akımı boru hattında koruma sağlamak amacı ile uygulamada yardımcı anotlar ile bağlanılarak sistem işleyişi sürdürülür. Yardımcı anotlardan sistemden akımın rahat bir şekilde reaksiyonları devam ettirebilmesi için düşük dirençli olması beklenir (TS 5141, 1987).

Çeşitli metal malzemeler yardımcı anot olarak koruma sistemlerinde kullanılırlar. Çelik maddeler, eski borular, tren ray sistemleri, travers gibi hurda demirler de yardımcı anot olarak katodik koruma sistemlerinde kullanılabilir. Yardımcı anotlarda bulunması gereken özel durumlar (İller Bankası, 2005):

- Belirlenen belli zaman aralığında bozulmadan sisteme anot geçişine yardımcı olmalı,
- Yüksek bir potansiyele ihtiyaç olmaksızın sistem için gerekli akımı verebilmeli,

Katodik korumada kullanılan tüm yardımcı anotlar gerçekleşen anodik reaksiyonlar sırasında ağırlıklarında azalmalar oluşur. Yalnız bu gerçekleşen ağırlık kaybının belirli sınırlar içerisinde olması beklenir. Akım birim başına olması gereken kütle kaybı minimum seviyede olmalıdır.

Silis katkılı demir anotlar dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde toprak altında kalan boru hatlarında en fazla kullanılan yardımcı anot çeşididir. Bu anotların yanı sıra ithal olarak getirilen grafit ve metal oksit kaplı titanyum anotlar da boru hatlarında kullanılmaktadır. Toprak altı sistemlerde, içinde klorür iyonu bulduran suyun çıkışı, yani iletkenliği daha fazla özgül direnci ise az olan sulu toprak zemin içerisinde ve deniz suyu içinde bulundurulmuş boru sistemlerinde gümüş-kurşun anotlar kullanılır. Endüstriyel alanda su altında kalan sistemlerde, toprak altında kalan sistemlerde, deniz suyu içerisinde bulunan ve değişik kimyasal elektrolitler içerisinde

kalan sistemlerde kullanılmak üzere çeşitli anot tipleri ortaya çıkarılmıştır (Yalçın ve Koç, 1999).

Grafit anotlar: Yardımcı anot cinslerinden grafit anotlar, düşük maliyetli olmaları avantajıyla deniz suyu ve tatlı su içerisinde kalan boru hattı sistemlerinin katodik olarak korunması sırasında yardımcı anot olarak genellikle kullanılmaktadır. Toprakaltında kalan boru hatlarında bu anodun kullanılabilmesi için sisteme ek olarak bir potansiyel oluşturulması gerekmektedir. Grafit anotlarda anodik tepkimeler çerçevesinde daimi olarak ortamda gaz çıkışı gerçekleşmesinden dolayı, anotların etrafında pasif bir film tabakası olmaz ve anotta pasifleşme gerçekleşmez. Toprak altı ya da üstü ve tatlı su içerisindeki boru hatlarının katodik korunmasında kullanılan yardımcı grafit anot yataklarında karbondioksit ve oksijen iyonları çıkışı gerçekleşmez. Deniz suları içerisinde kalan boru hatlarının korunması sırasında klor gaz çıkışı gerçekleşir. Akım yoğunluğunun oldukça yoğun olduğu durumlarda ise klor ile birlikte karbondioksit ve oksijen gazı da bir miktar da olsa açığa çıkabilir.

Grafitin içinde bulundurduğu elektrot potansiyeli çeliklerde kullanılması durumunda 1,7 Volt' a kadar daha fazla pozitif değer alırlar. Bu halde akım oluşmadığı halde çelik anot, grafit katot olarak işlev görecektir. Grafitin anot görevi yapabilmesi için katodik koruma sistemine 1,7 Volt ek potansiyel gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Yalçın ve Koç, 1999). Bu sebepten dolayı toprakaltında kullanılan çelik boru hatlarının korozyondan etkili bir şekilde korunması için grafit anotların sistem içerisinde yardımcı anot olarak kullanılması daha uygun olacaktır.

Demir-Silikon anotlar: Bünyesinde % 14,4 oranına yakın silisyum bulduran dökme demir anotlar inert anot olarak uygulamada sıklıkla kullanılır. Anotların yüzeyinin etrafında az bir zaman içerisinde çok sağlam bir silisyum dioksit film tabakası meydana gelir. Oluşan bu tabaka sayesinde anot parçalanmaz, fakat silisyum dioksit iletken bir malzeme olduğundan dolayı anodun sahip olduğu direncin daha fazla yükselmesine faydası yoktur. Saf haldeki silisyum dioksitin rezistivitesi oldukça fazladır. Anodun yüzey alanının tamamını silisyum dioksitle kapatırsa eğer anot akım üretmez hale gelir. Fakat anot yüzeyinde,  $Si_4 + 4H_2O \rightarrow Si(OH)_4 + 4H^+$  reaksiyonu gerçekleşir. Bu reaksiyonda iletkenlik hidrojen iyonları sayesinde gerçekleşir. Bunun sayesinde anot pasifleşmeye uğramadan akım üretme işlemini gerçekleştirebilir. Demir silikon anotların yüzey alanlarının tamamının silisyum dioksit film tabakasına maruz

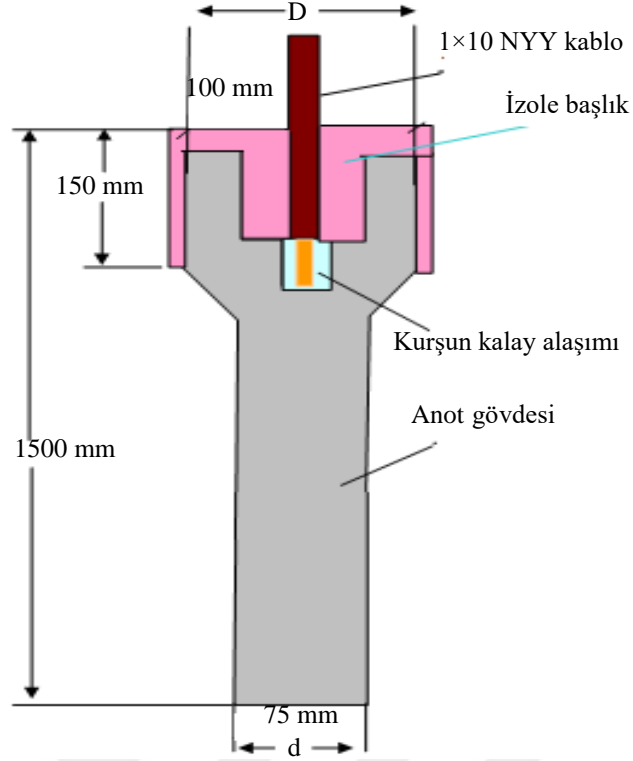
kalmaması için anot içerisinde ihtiva edilen silisyum oranının % 14,4 olması gerekmektedir.

Demir silikon anotlarının sahip oldukları özelliklerden ağır ve kırılabilir olması bu anotların en büyük dezavantajı olmakla beraber anot yatağının kuruması durumunda akım vermesinde yüksek oranda azalmalar görülür (Bölük, 2006).

Demir silikon anotları toprak altında ve tatlı sular içinde en düşük kayıplarla ağırlıklarını korurlar. Anotta gerçekleşen ağırlık kaybı 0,25–1 kg/A.yıl şeklindedir. Deniz suyu içerisinde oluşan klor gazı çıkışı sebebiyle, demir silikon anotlarının yüzeyinde pasiflik yok olur. Bunun sonucu olarak anot yüzeyinin çevrelerinde çukur korozyonu gerçekleşir. Gerçekleşen bu durumun önüne geçebilmek amacıyla anot içerisine %4,5 seviyelerinde krom maddesi eklenerek elde edilen kromlu demir silikon anot (HSCI) kullanılması gerekir (Yalçın ve Koç, 1999). Demir-silikon anotların kimyasal içeriği Tablo 2.17’de verilmiştir. Şekil 2.61’ de demir-silikon anot şeması gösterilmiş olup Tablo 2.18’de ise bu anodun ölçüleri verilmiştir.

**Tablo 2.17** Kromlu ve kromsuz demir-silikon anotların kimyasal içeriği

Elementler	HSI anot (Kromsuz demir-silikon)	HSCI anot (Kromlu demir-silikon)
Silisyum	14,4	14,4
Krom	-	4,5
Karbon	En çok 0,95	En çok 0,95
Mangan	En çok 1	En çok 1
Demir	Kalan	Kalan



Şekil 2.61 100 lb demir silikon anodu şeması

Tablo 2.18 TS-5141'e göre demir-silikon anot ölçüleri (TS 5141, 1987)

Anot Tipi	Anot kütlesi (kg)	Anot Çapı (mm)	Anot Başlığı Çapı (mm)	Anot Boyu (mm)	Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> )	5 m Uzunlukta Bakır Bağlantı Kablosu Kesiti (mm <sup>2</sup> )
IS-1	3	30	40	500	550	NY Y 1x4
IS-2	5	30	40	750	820	NY Y 1x4
IS-3	6,4	30	40	1000	1100	NY Y 1x6
IS-4	5,5	45	50	500	880	NY Y 1x6
IS-5	10	30	40	1500	1650	NY Y 1x6
IS-6	11	60	80	500	1050	NY Y 1x10
IS-7	18	60	60	900	1700	NY Y 1x10
IS-8	28	60	80	1200	2650	NY Y 1x10
IS-9	43	75	100	1500	3757	NY Y 1x10
IS-10	45	100	100	800	1700	NY Y 1x10
IS-11	53,6	76	85	1520	3600	NY Y 1x10

Platin ile kaplanmış titanyum anotlar: Titanyum metalinin etrafına 5-10 µm kalınlığında platin malzeme kaplanarak yüksek performansa sahip anotlar oluşturulur. Bu tip anotlardan deniz suyu içerisinde oldukça fazla yoğunluklarda akım alınabilir. Deniz suyunun içerisinde 1000 A/m<sup>2</sup> olan akım çıkışı, toprak zeminlerde kok tozu anot yatağı içerisinde 100-300 A/m<sup>2</sup> dolaylarındadır. Platin kaplı titanyum anotlarının ağırlık kayıpları düşük miktarlarda gerçekleşir. Deniz suyunun içerisindeki anodun kaybettiği ağırlık 5-10 mg/A.yıl'dır (Yalçın ve Koç, 1999).

Platin kaplı titanyum anotların klor iyonlarına karşı oldukça dayanıklıdır ve akım yoğunlukları çok yüksektir. Yüksek ücretli olduğundan dolayı uygulamada pek fazla tercih edilmezler. Platin kaplı titanyum anot ölçüleri Tablo 2.19'da verilmiştir.

**Tablo 2.19** Platin kaplı titanyum anot ölçüleri (Yalçın ve Koç, 1999)

Anot Çapı (mm)	Anot Toplam Boyu (mm)	Kaplanmış Bölge Boyu (mm)	Kaplama Kalınlığı (µm)	Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> )
19	500	150	2,5-5,0	90
19	300	75	2,5-5,0	45
19	575	225	2,5-5,0	135
19	500	225	2,5-5,0	135
12,7	500	150	2,5-5,0	60
12,7	575	225	2,5-5,0	90
12,7	425	125	2,5-5,0	50

Metal oksit kaplı titanyum anotlar: Titanyumun etrafı iletkenliği oldukça fazla olan metal oksitler ile sarılarak oluşturulan anotlarda katodik koruma esnasında ağırlıklarında azalma oldukça düşüktür. Anodun yüzey alanında herhangi bir polarizasyon olayı olmadığından dolayı devamlı olarak aktif olur. Bu anotlar hem toprak zemin içinde hem de deniz suyu içerisinde etkili bir şekilde kullanılır. Asit bulunduran çevrede asidin korozif özelliklerine karşı oldukça dirençlidirler (İller Bankası, 2005).

Deniz suyunun içinde 600 A/m<sup>2</sup> olan akım çıkışı, toprak zemin içerisinde kok tozu anot yatağı kullanıldığı takdirde 100 A/m<sup>2</sup>'ye kadar gerileyebilir. Metal oksit kaplı olan titanyum anotların dış akımın potansiyelinin daha yükselmeden anotlardan fazla akım sistem tarafından alınabilir. Bu durumda küçük ölçülere sahip anot sistemlerde kullanıldığında anot yataklarında küçülmede sağlanabilir (Yalçın ve Koç, 1999). Şerit şeklindeki titanyum anotların bütün yüzey alanı metal oksit kaplanmalıdır. Demir-silikon anotların özelliklerine eşdeğer durumda olan şerit şeklinde titanyum anotlar kullanmak mümkün olmaktadır.

Metal oksit kaplı titanyum anotların farklı korozif çevrelerde sahip oldukları akım ve kullanılabilecekleri en fazla ortam özgül direnci değerleri aşağıdaki çizelgede ayrıntılı bir şekilde görülmektedir (Tablo 2.20).

**Tablo 2.20** Metal oksit kaplı titanyum anotların akım ve ortam özgül direnç değerleri (Akad.net, 2013)

Ortam	Akım Değeri (A/m <sup>2</sup> )	Maksimum Dolgu* veya Ortam Özgül Direnci (Ohm.cm)
Tatlı su	100 (en çok)	35 – 30000
Zemin	100 (en çok)	50
Çamur	50 – 100	-
Kirli ve az tuzlu su	100 – 300	-
Deniz suyu	600 (en çok)	35

\*Metal oksit kaplı titanyum anotlar için kullanılan dolgu maddesi metalürjik veya kalsine petrol kokudur.

Metal oksit kaplı titanyum anotlar tüp ve şerit şeklinde iki farklı tipte imal edilebilirler. Bir veya daha fazla toplu bir şekilde aktif hale getirilmiş olan titanyum tüplerin bir tek kablo ile birleştirilmesiyle LİDA dizisi oluşturulmuş olur. LİDA dizilişinin geldiği anlam ise lineer dağılımlı anot şeklindedir (Akad.net, 2013). LİDA anot dizilişi Şekil 2.62’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.62** LİDA anot dizilişi

Farklı korozif çevrelerde kullanılan LİDA dizisi oluşturmak için kullanılan tüp tipi titanyum anotların ölçüleri ve akım çıkışı değerleri aşağıdaki çizelgede detaylı bir şekilde verilmiştir (Tablo 2.21).

**Tablo 2.21** Metal oksit kaplı titanyum anotların boyutları ve çıkış akımı değerleri (Yalçın ve Koç, 1999)

Çap (mm)	Boy (mm)	Zemin ve Tatlı suda Çıkış Akımı (Amper)	Deniz Suyu İçinde Çıkış Akımı (Amper)	Çamur İçinde Çıkış Akımı (Amper)
25	500	4,0	25	4
25	1000	8,0	50	8
16	500	2,5	15	-
16	1000	5,0	30	-

Gümüş-Kurşun anotlar: İçerisinde % 1-2 oranında gümüş ihtiva eden kurşun anotlardan deniz suyu içerisinde yaklaşık olarak 50-200 A/m<sup>2</sup> arasında akım korunacak olan boru hattına verilebilir. Bu anotların başlangıçta kaybettikleri ağırlık 1 kg/A.yıl gibi yüksek sayılabilen bir değer olsa da, 1 aya yakın bir süre sonra kaybettiği ağırlık 30-50 g/A.yıl seviyelerine kadar inebilir. Buna sebep olan anot yüzeyinde meydana gelen kurşun peroksit film tabakasıdır. Oluşan bu film tabakası sayesinde anodun çözünüp harcanması önlenmiş olur. Oluşan bu duruma karşılık olarak iletkenliğin yüksek oluşu sebebiyle anodun direncinde yükselmeye sebep vermez. Eğer korunacak olan boru hattı anottan 400 A/m<sup>2</sup> 'den fazla akım alacaksa, peroksit tabakasının alt kısmında kurşun klorür ya da kurşun oksiklorür maddeleri oluşması görülebilir. Anot yüzey alanında oluşan yumrular ya da kabarcık şeklinde görülür. Bu oluşan bileşikler iletken özelliğe sahip olmadıklarından dolayı anot yüzeyinden akımın katoda geçmesinde aksaklıklara sebep verir (Yalçın ve Koç, 1999).

Kurşun malzemeden üretilmiş galvanik anotların toprak zemin ve tatlı su içerisinde koruma yapması durumunda anodun etrafında peroksit film tabakası görülmez. Aynı zamanda anodun ihtiyaç olandan düşük akım yoğunluklarında kullanılması durumunda peroksit film tabakası oluşumu meydana gelmez. Böylece anot içerisindeki kurşun madde iyon haline gelerek korozif çözeltiliye katılır. Bundan dolayı gümüş-kurşun tipi anotlar yalnızca deniz suyu içerisinde kullanıma uygundur. Farklı bir durum da şöyledir saf kurşun anotların etrafında deniz suyu içerisinde kurşun klorür meydana gelmesinden dolayı kısa sürede pasifleşme oluşur. Pasifleşmenin önüne geçebilmek için düşük yüzdelerde gümüş-kurşun alaşımının kullanılması gerekir. Elektrolit içerisinde klorür ile birlikte sülfat olması durumunda dahi pasifleşme gerçekleşmez.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde kullanılabilecek olan yardımcı anotların özellikleri aşağıda verilmiştir (Tablo 2.22).

**Tablo 2.22** Yardımcı anotların başlıca özellikleri (Yalçın ve Koç, 1999).

Özellik Anot	Teorik Akım Kapasitesi (kg/A.yıl)	Özgül Direnç ( $\mu\text{Ohm.cm}$ )	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kullanılma Yeri	Çekilen Maksimum Akım (A/m <sup>2</sup> )		
					Deniz	Zemin	Tatlı Su
Platin Kaplı Titanyum	$8,6 \cdot 10^{-6}$	48,2	4,5	Deniz suyu Zemin	1000	300	-
Metal Oksit Kaplı Titanyum	0,01	48,2	4,5	Deniz suyu Tatlı su Zemin	600	100	100
Demir Silikon (HSI)	0,3	72	7	Tatlı su Zemin	120	60	120
Demir Silikon (HSCI)	0,3	72	7	Deniz suyu Zemin	120	60	120
Gümüş Kurşun	0,09	25	10,9	Deniz suyu	200	-	-
Grafit	0,1–1,0	700	1,6	Deniz suyu Tatlı su Zemin	30	10	2,5
Hurda Çelik	9	17	7,8	Deniz suyu Zemin	-	5	-

Aşağıdaki çizelgede ise yardımcı anotlar için kullanma faktörü ve maksimum doğru akım çıkış potansiyellerinin değerleri verilmiştir (Tablo 2.23).

**Tablo 2.23** Yardımcı anotların kullanım faktörleri ve en yüksek doğru akım çıkış potansiyelleri (Üneri, 2000)

Anot Özellik	Hurda Çelik	Grafit	Demir-Silikon	Gümüş-Kurşun	Titanyum Anotlar
Maks. DC Çıkış Potansiyeli (Volt)	50	50	50	25	8
Kullanma Faktörü (%)	30	50	90	80	90

#### 2.4.3.2. Yardımcı anotların kullanım ömürleri

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde galvanik anotlar gibi kullanılan yardımcı anotlarla korunan sistem anotlardan akım çektikçe anotların ağırlıklarında kayıplar oluşur. Yardımcı anotlarda galvanik tip anotlara göre ağırlık kaybı daha düşük



bir şekilde gerçekleşir. Yani görülen bu durumda yardımcı anotların kullanım ömürleri galvanik tip anotlara göre daha fazla olmaktadır.

Yardımcı anotların kullanım ömrü (2.11)'de verilen eşitlik ile hesaplanabilir. Bu formülde yer alan eskime faktörü yerine yardımcı anot kullanım faktörü ve anot verimi olarak % 60 değeri kullanılarak yardımcı anotların kullanım ömrünü bulabiliriz. Yalnız kullanılan bu formül ile hesaplanan kullanım ömrü yüksek değerler alabilir. Hesaplanan bu yüksek değere teorik ömür ismi verilir.

Metal oksit kaplamalı yardımcı anotların kullanım ömürleri hesaplamasında (2.11)'deki eşitliğin yerine (2.17) ve eşitlik (2.18)'deki logaritmik eşitlikleri kullanmak mümkün olur. (2.17)'deki eşitlikte toprak zemin ve tatlı su içerisinde kullanılmakta olan yardımcı anotların kullanım ömrü (2.18)'deki eşitlikte ise deniz içerisinde kullanılmakta olan yardımcı anotların kullanım ömürlerini hesaplamamızda kullanmak mümkündür.

Toprak zemin ve tatlı suların içinde kullanılmakta olan yardımcı anot tipleri için;  
$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 3,3 - \log(i(A/m^2)) \quad (2.17)$$

Deniz suları içerisinde kullanılmakta olan yardımcı anotlar için;  
$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 2,3 - 0,4 \times \log(i(A/m^2)) \quad (2.18)$$

i: Yardımcı anot akım yoğunluğunu ( $A/m^2$ ).

#### **2.4.3.3. Yardımcı anotların anot yatağı içine montajı**

Katodik korumam sistemlerinde anot kullanımında anotların uygun montajı önemli etkilerde bulunur. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde dolgu malzemesi kullanıldığında anotların toprak tarafından emilmesi azalırken, uygulanan dış akım sonucu gerçekleşecek anodun ağırlık kaybının da önüne geçilir.

Yardımcı anotların montajı sırasında, petrol koku, grafit ve kok kömürü tozu anot yataklarının dolgu malzemesi olarak kullanılır. Sayılan bu dolgu malzemeleri içerisinde en kullanışlı ve etkin çözümü veren malzeme kok tozu olmaktadır. Kok tozu içerisinde % 10 değerinde sönmemiş kireç ihtiva eder. Kok tozunun özgül direncinin maksimum 50 Ohm.cm değerinde olması gerekmektedir. Anot yatağında kullanılan kok tozunun tanelerinin çaplarının maksimum 10 milimetre de olması gerekir aksi takdirde dolgu malzemesi görevini yapmaz. Titanyum şerit anotla koruma sağlanacaksa eğer anot yatağındaki kok tozunun tane çapının maksimum 2 milimetre çapında olması gerekir. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde yardımcı anot olarak kullanılacak olan titanyum yardımcı anodunun anot yatağı içerisindeki dolgu malzemesi olarak kullanılan kok tozunun anoda yakın olan iç bölgelerdeki tane çaplarının küçük

olması gerekirken dış bölgede kalan dolgu malzemelerinin çapları ise daha kalın bir şekilde kullanıma uygun olacaktır (İller Bankası, 2005).

Kok tozuna ait bazı belli başlı özellikler aşağıdaki Tablo 2.24'te toparlanmış ve anlaşılır bir şekilde özetlenmiştir (Yalçın ve Koç, 1999).

**Tablo 2.24** Yardımcı anot yatağında dolgu maddesi olarak kullanılan kok tozu özellikleri

<b>Kok Tozunun Özellikleri</b>	<b>Sınır Değerler</b>
Yoğunluk	0,7 – 0,8 kg/litre
Kütle kaybı	En çok 0,1 kg/A.yıl
Uçucu organik maddeler	En çok % 3
100 no'lu elekten geçen	En çok % 5
Kül	En çok % 20
Rutubet	% 10 - % 15
Özgül elektrik direnci	50 Ohm.cm
Maksimum tane çapı	10 mm

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde yardımcı anotların yerleştirileceği ve anotların kolayca harcanmasına engel olacak olan anot dolgu malzemelerinin içine gömüleceği yardımcı anot yataklarının nasıl olması gerektiğini (sığ mı?, derin mi?) belirleme aşamasında bizlere yardımcı olacak bazı belli başlı hususlar vardır. İşte bunları belirlemekteki bu hususların önemli noktaları aşağıda sıralanmış olup bu kriterler eşliğinde tercihimizi yapabiliriz. Aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır (İller Bankası, 2005):

- Yardımcı anot yatağı tercihi yapılacak bölgenin zemin özgül direncinin oldukça düşük olması en önemli tercih sebeplerindedir.
- Sistemin sürekliliğini sağlayabilecek miktarda anodun yerleştirilmesine uygun alan tercihinden sonra bu alanın kazılması esnasında üçüncü şahıslar ile ilgi çıkabilecek sorunların önceden çözülüp işleme o şekilde devam edilmesi gerekmektedir.
- Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde duyulan akım ihtiyacı dolayısıyla herhangi bir şebekeden elektrik alınması gerekmektedir. Akım ihtiyacı için alınan elektriğin şebekesinin etrafında emniyetin sağlanmalıdır ya da güvenli bir şebeke üzerinden akım ihtiyacı sağlanmalıdır.

- Sıcak aylarda ise anot yatağında sıcaklığın etkisinden dolayı kuruma oluşur ve kuruma anotların dirençlerini olumsuz yönde etkiler. Oluşacak olan bu olumsuz etkilerin önüne geçebilmek amacıyla anodun yatağının kazıldığı yerin herhangi bir su kaynağına yakınlığı sağlanmalı ve sıcak aylarda buraların sürekli sulanması sağlanmalıdır.
- Anot yatağı olarak seçilen alanın yakınlarında anotların manyetik ve elektriksel etkilerinden etkilenecek herhangi bir başka metalik malzemelerin veya yapıların bulunmamasına dikkat edilmelidir. Eğer böyle bir sistem var ise anot yatağının ya yeri değiştirilmeli ya da anotların manyetik ve elektriksel kuvvetlerinin hesaplanması yapılarak iki veya daha fazla şekilde bölünerek etraftaki başka metalik sistemlere zararı dokunmayacak ölçülerde küçültülecek alana düzgün bir şekilde anot yatakları kurulmalıdır.
- Dış akım kaynağının sistem devresinin sağlandığı trafo redresör ünitesinin ilerleyen sürelerde kullanımdan kaynaklı ya da üretiminden kaynaklı oluşabilecek arızaların olabileceği ön görülmeli ve bu arızaların zamanında müdahale edilebilmeleri için kolay ulaşılabilecek alanlara bu sistemlerin kurulması beklenmektedir.
- Yardımcı anotların işletmeciye yakın kısımlara monte edilmesi halinde ayarların kontrolü sistemin bakım ve onarımı kolay bir şekilde sağlanacaktır.
- Anotların her an dört mevsim de kolayca kontrol ekibinin ulaşabileceği alanlara kurulmalıdır.
- TS 5141 standartlarına uygun olarak yardımcı anotların koruması sağlanacak olan boru sistemine minimum 30 metre uzaklığa ve anotların arasındaki mesafenin de minimum 3 metre aralıklarla yerleştirilmesi gerekmektedir (TS 5141, 1987).
- Genel kural ise yardımcı anot yatağı katodik olarak koruması sağlanacak olan boru hattından en az 50 m, en çok ise 100 m mesafeye sahip olması gerekmektedir (Arkatodikkoruma.com, 2013).

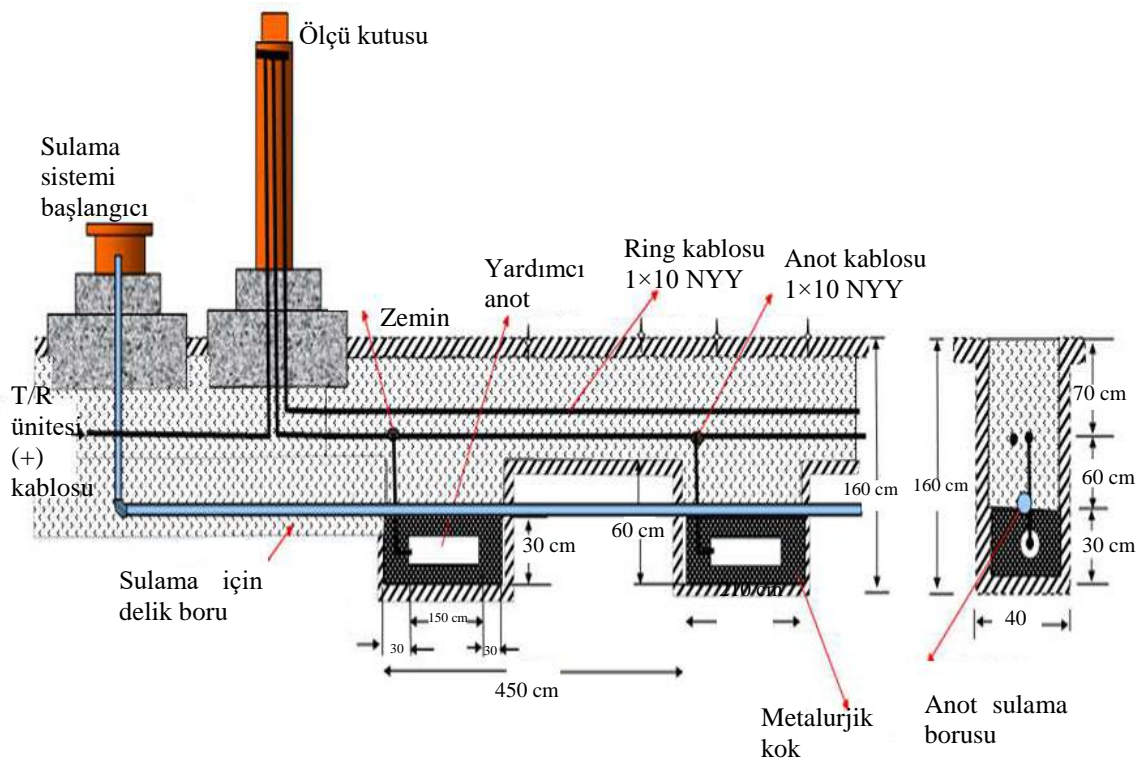
Bu kriterler dikkate alınarak anot yataklarının sığ mı yoksa derin bir şekilde açılacağı belirlenebilir.

Sığ açılmış anot yatakları: Sığ olarak anot yatağı hazırlayabilmemiz için öncelikle müsait durumda geniş bir alana ihtiyacımız olacaktır. Anot yatağı olarak hazırlanacak alanın kesinlikle başka kullanım alanları için de kullanılmaması

gerekmemektedir. Standart olması gereken toprağın özgül direncinin 1000 Ohm.cm civarlarındaki bölgelere sığ yatakları açılabilir (Arkatodikkoruma.com, 2013).

Bu anot yataklarının tasarlanması sırasında anotların nasıl konumlandırılacağı belirlenip ona göre kazı çalışmalarını başlatmak gerekir. Sığ yataklara yardımcı anotları dik ya da yatay pozisyonda gömebilmek mümkün olmaktadır.

Yatay olarak anot yatağına konumlandırılacak olan anotların arasındaki mesafelerin 4,5 metre olacak şekilde dizayn edilmesi gerekir. Sığ yatakların zemin etüdü içerisinde kolaylıkla küçük teçhizatlar yardımıyla kazılıp hazırlanabildiğinden dolayı sürekli tercih edilebilen bir anot yatağı şeklidir. Sığ yataklara anot montajı yatay pozisyonda gerçekleştirilecekse montaj sırasında uyulması gereken durumlar ve anotlar arası mesafe ölçüleri aşağıdaki Şekil 2.63'te verilmiştir (İller Bankası, 2005).

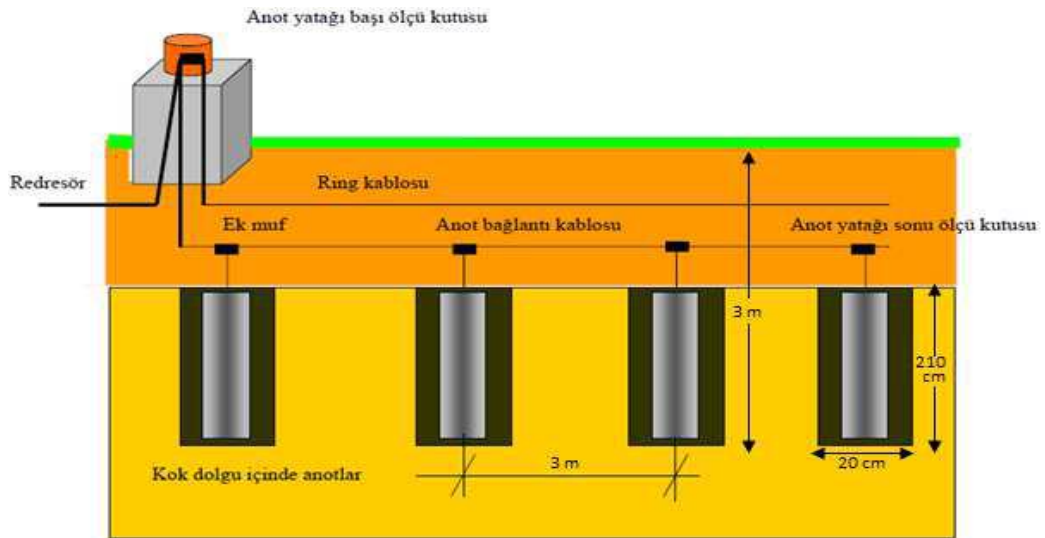


Şekil 2.63 Sığ olarak hazırlanmış anot yatağına yardımcı anotların yatay pozisyonda montajı

Anot ile koruma sistemi arasında gerçekleşen tepkimeler sonucunda anot boru hattına akım taşırken anot yatağı kurur anot yatakları kurudukça da anottan sisteme verilen akımda azalmalar gerçekleşmektedir. Oluşan bu durumu önlemek amacıyla anot yatağının üzeri açılıp gömülü halde bulunan anotların üzerlerine dışarıdan su tutulup sulama işlemi bittikten sonra anot yatağı kapatılır. Fakat bu yapılan işlem işletme maliyetini oldukça yükseltmekte olup oldukça zahmetli bir durum halindeydi. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda bu durumun önüne geçebilmek ve işletme

maliyetlerini kısmak amacıyla Şekil 2.63'te görüldüğü üzere anot dolgusunun etrafı delikli boru ile çevrenmektedir yapılan bu uygulama sayesinde anot yatağı ihtiyaç hasıl olduğu durumlarda kolayca sulanmaktadır. Böylelikle anot yatağı kurummasının önüne bu yöntem ile geçilebilir. Bu uygulama ayrıca diğer sulamasız uygulama sisteminden daha fazla akım çıkmasına yardımcı olmaktadır.

Yardımcı anotlar sığ olarak hazırlanmış olan anot yataklarına yatay pozisyonda yerleştirilebildiği gibi dikey pozisyonda da yerleştirerek gömülebilir. Ülkemizin arazi yapısı gereği sıkıntısız bir şekilde iki yöntemi de uygulamak mümkün olup her ikisi de katodik koruma sistemlerinde uygulanmaktadır. Sulama sistemli sığ anot yataklarında anotların yatay pozisyonda olması sulama sisteminin etkisi kısa sürede görülür. Anotlar arası mesafenin 4,5 metre mesafede olmasından dolayı geniş arazilere anot yataklarının kurulması gerekmektedir. Dikey pozisyonda yataklara montajı sağlanan yardımcı anotların arasındaki mesafe 3 metre dolaylarında olacağından dolayı anot yatağının alanının yatay montaj sağlanan anotlara göre daha azalacağından dolayı anot yatağı için geniş arazilere ihtiyaç kalmaz. Dikey pozisyonda yerleştirilmiş olan anotların yatakları daha derine kazıldığından dolayı toprağın altında oluşan nemden faydalanma imkânları yatay pozisyonda yerleştirilmiş olan anotlardan daha fazla olacaktır. Maliyet açısından yani kazı ve dolgu malzemesinin fazla kullanılacağından dolayı dikey anot yerleştirmek biraz daha yüksek olmaktadır. Bu açıklamalar ışığında mantıklı bir kapıdan bakıldığı zaman katodik koruma sistemlerinin uygulama yapısı incelendiğinde yardımcı anotların sığ anot yataklarına yatay pozisyonda gömülmesinin tercih edildiği görülebilir (İller Bankası, 2005). Şekil 2.64'te sığ olarak yerleştirilmiş yardımcı anotların şeması gösterilmektedir.

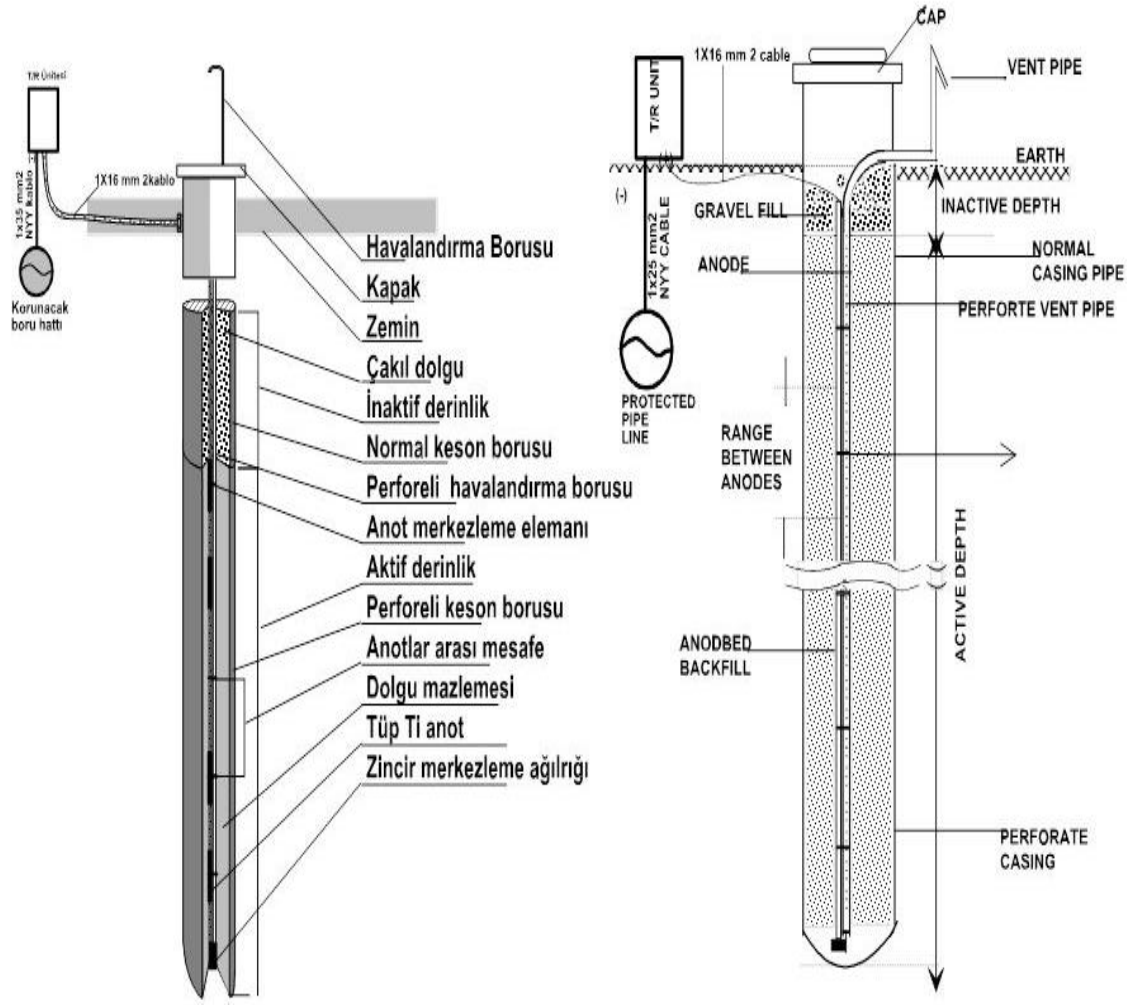


Şekil 2.64 Yardımcı anotların sığ anot yataklarına dikey pozisyonda gömülmesi

Derin kuyu anot yatakları: Derin kuyu anot yataklarının hazırlanması basınçlı veya su kullanan sondaj makinelerinin yeri delerek derin bir kuyu kazılarak olur.

Yardımcı anotlar genellikle 50 metre derine açılmış derin kuyu yataklarına dikey pozisyondan birbirlerine kablo yardımıyla bağlanarak sisteme dâhil edilir. Anot yatağı için kazılan kuyunun boyu sistemin ihtiyaç duyduğu anot sayısına göre değişkenlik gösterir daha derinlere ya da daha alçağa kazılabilir. Açılan kuyuların çapı genel olarak 30 cm civarında olmaktadır (İller Bankası, 2005).

Kuyuların içersin de klor gazı oluşur. Gazın ortamdaki atılması için 3 santimetre civarında plastik borular anot yataklarına yerleştirilir (Şekil 2.65). Sisteme dahil edilen bu plastik borular gazı ortamdaki atabilecek kadar büyük ve delikli olması gerekmektedir. Ayrıca boruda bulunan bu deliklerden içeride dolgu malzemesi girmeyecek kadarda küçük çapta olması gerekmektedir. Bu gaz çıkış borusu anot taşıyıcı yani keson olarak katodik koruma sistemlerinde kullanılır (Yalçın ve Koç, 1999).



Şekil 2.65 Derin kuyu anot yatak şeması

Katodik koruma sisteminde derin kuyu tipindeki anot yataklarında anodun dolgu malzemesi olarak kullanılan madde genel olarak kok tuzudur. Dolgu malzemesi derin kuyuya doldurulduğunda aralarda boşluklar bırakılacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu durumu gerçekleştirmek için ise kuyu içerisindeki tüm suyun kuyudan bertaraf edilmesi gerekmektedir. Doldurma işlemi sırasında kok tozu kayganlaştırıcı özellik gösteren malzemeler ile karıştırılarak akışkan özelliği kazandırılıp pompa yardımıyla kuyunun en derininden başlayarak doldurulma işlemi tamamlanır. 90 kilogram kok tozunun içine 500 gram civarında deterjan ve bu karışıma yetebilecek oranda su ilavesi sağlanarak 100 litre akışkan kıvama sahip kok tozu karışımı elde etmek gerekir (Yalçın ve Koç, 1999). Anotların ve anot dolgu malzemesinin bulunduğu bölgeye aktif derinlik bölümü denir. Bu bölüm sadece anotların bulunduğu kısımda kok tozu dolgusu bulundurmasından dolayı adını aktif derinlik bölgesi olarak almıştır. Kok tozu ile doldurulan derin kuyularda kok tozu dolgu maddesinin üstünden itibaren taş ile doldurulmaya başlanır. Bu bölgeye ise inaktif derinlik kısmı adı verilir.

Katodik koruma sistemi içerisinde anot yatağı olarak kullanılan derin kuyulara gömülen anotların birbirine bağlanmasında kullanılan kabloların özel bir yapıda olması gerekmektedir. Derin kuyu içerisinde gerçekleşen tepkimeler sırasında klor gazı meydana geleceğinden dolayı anot kabloları teflon, neopren ve silikon benzeri klor gazına karşı dirence sahip maddeler ile kaplı olmalıdır. Anot kablolarının molekül yapıları polietilen ya da kloro-trifloro etilen ile kaplı olması gerekmektedir. Uygulamada kullanılan EPR/CSPE tipi kablo ve PVDF/HMWPE tipi minimum 16 mm<sup>2</sup> kesitli kablolar derin kuyu anot yataklarında en yaygın kullanıma sahip kablo cinsleri olup oldukça dayanıklıdır.

Derin kuyu şeklinde hazırlanan anot yataklarında şerit şeklinde ya da zincir tipinde titanyum anotlar demir-silikon tipi yardımcı anotlara göre hafif yapıda olmaları ve ağırlıklarındaki azalmaların zaman içerisinde daha düşük olması sebebiyle titanyum tipi yardımcı anotlar piyasada kendine daha geniş kullanım alanları bulurlar. Daha hafif olmaları ve kütle kayıplarının çok daha az olması nedeniyle daha çok kullanılırlar (İller Bankası, 2005).

Derin kuyu şeklinde hazırlanmış olan anot yataklarının sahip oldukları özellikler aşağıda sıralanmış olup avantaj ve dezavantajlarını görmemizi sağlayacaktır.

- Katodik olarak korunacak olan boru hattına, derin kuyu anot yataklarında akım toprak altından verildiğinden dolayı kaçak akım oluşmaz ve etkileriyle de karşılaşılmaz.
- Toprağın altında tutulan nem yüksek oranlarda olduğundan dolayı trafo redresör ünitesi daha yüksek performanslı çalışabilir.
- Korunacak olan sisteminin şehir içinde kalan kısımlarında anot yatakları için geniş anot yatakları kazılamayacağı ve yeraltından geçen birçok metalik yapının bulunup tespitinin de imkânsız olup katodik korumanın bunlara zarar verebileceği durumlarda derin kuyu anot yataklarıyla anot yatağının hazırlanması sisteme katodik koruma sağlayabilmektedir. Diğer tür durumlarda ise tespit edilemeyen toprak altında kalan farklı metalik yapılara katodik korumanın verdiği manyetik zarar ve kazılacak geniş anot yatağı alanının bulunamamasından dolayı katodik koruma sisteme uygulanamayacaktır. İşte bu anlatılan sebepler bize derin kuyunun en önemli faydalarındandır.
- Sığ yataklara göre zemin özgül direninin yüksek olduğu kurak alanlarda anot yatağının direnci istenilen standartlara getirilebilir. Çeşitli olumsuz çevre şartları ve doğa olaylarına karşı anotları koruyarak sığ anot yataklarına göre akımın eşit olarak dağılması sağlanır.
- Sığ anot yataklarına göre daha yüksek maliyetli olup montaj ve bakımı zor olmaktadır.

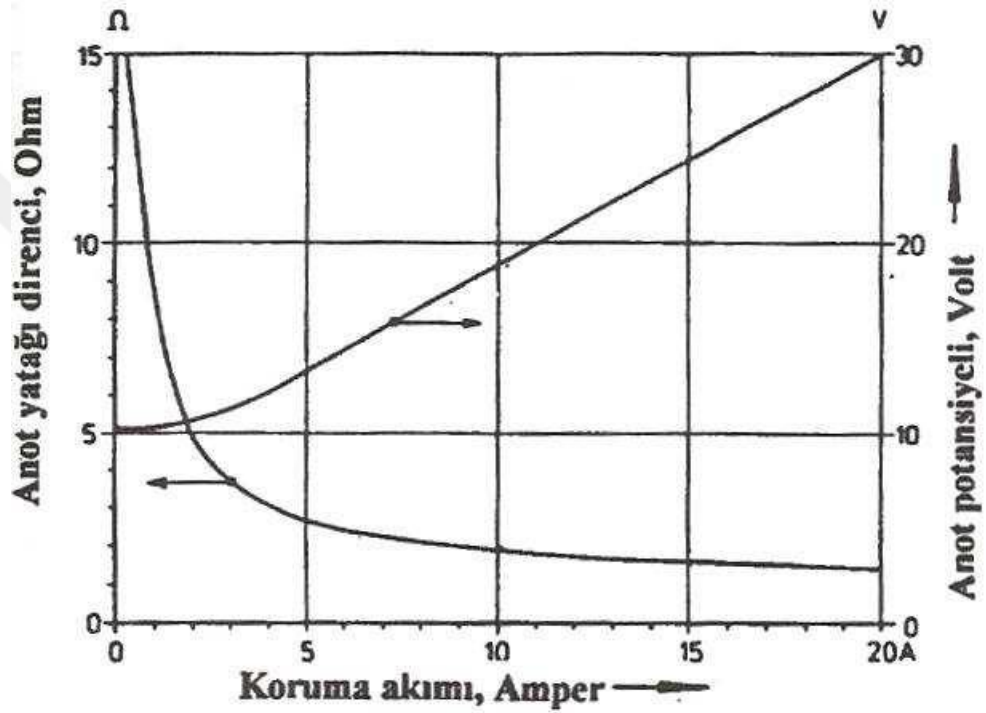
#### **2.4.3.4. Yardımcı anotların yatak direnci**

Anot yataklarının sığ ya da derin kuyu tipi fark etmeksizin anot yatak dirençlerinin oldukça düşük olması ve ilerleyen süre zarfı içerisinde de yükselmemesi gerekmektedir. Yardımcı anotların yatağının direnci yüksek değerlerde olursa eğer katodik koruma sağlamak için uygulanan akımında yüksek değerde potansiyel ile sağlamak zorunda kalınacaktır. Uygulanan yüksek akım sonucu sistem maliyeti artacaktır. Anot yatağında oluşabilecek bu yüksek dirençleri azaltılabilecek tedbirler şu şekildedir:

- Özgül direnci düşük zeminlere anot yataklarını açmak gerekir.
- Alan sıkıntısı olmayan bölgelerde paralel bağlanan anotların arasındaki mesafe arttırmak mümkün olacaktır.
- Anotların paralel bağlanması sırasında anotlar sayıca arttırılabilir.



- Anot etrafında bulunan kok tozunu kullanılarak anot direncini düşürmek mümkün olacaktır.
- Boy/çap oranı yüksek değere sahip olan yardımcı anotlar katodik korumada kullanılmalıdır.
- Anot yatağı direncinin üst sınırı katodik koruma esnasında ihtiyaç duyulacak olan akıma göre belirlenir. Üst direnç sınırını belirlemek için aşağıdaki gösterilmiş olan 10000 Ohm.cm zemin özgül direnci için hazırlanmış grafik kullanılır (Şekil 2.66).



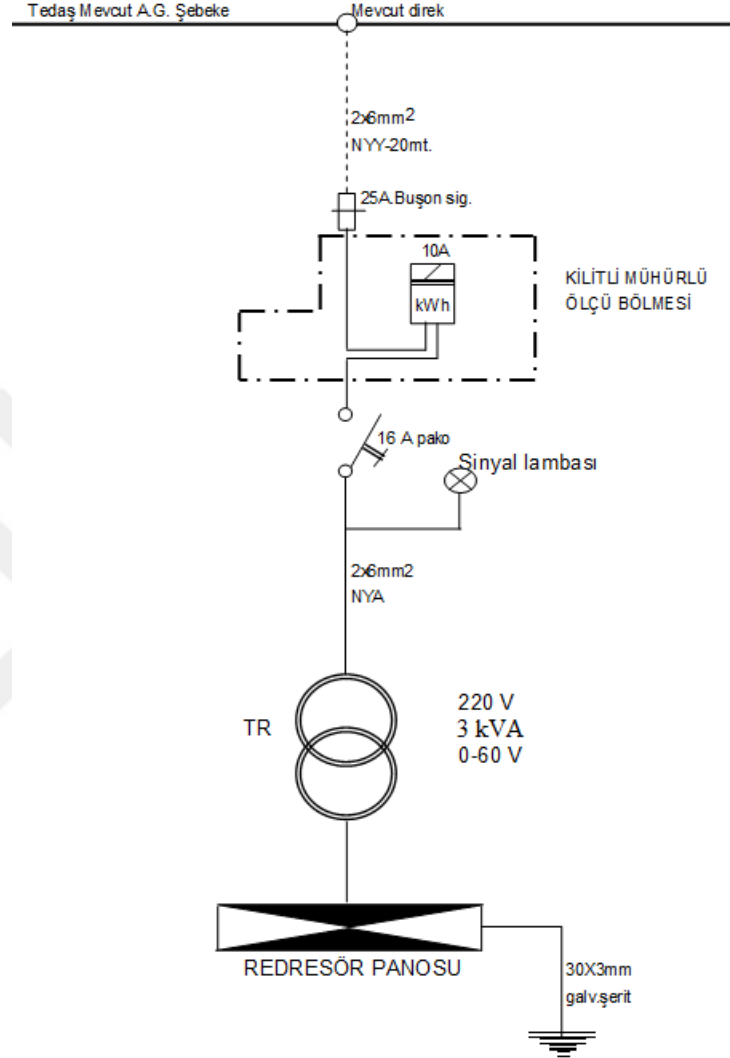
Şekil 2.66 Yardımcı anotların yatak direnci üst sınırının belirlenmesinde kullanılan grafik

Yukarıdaki grafikte belirtildiği gibi katodik koruma esnasında sistemin ihtiyaç duyduğu akımın 2 Amperden az olması durumunda yardımcı anot yatağının direnci 5 Ohm veya daha üst değerleri seçmek mümkün olacaktır. Eğer akım ihtiyacı 5 Amper ve üzerinde bir değer olur ise anot yatağı direncinin 2 Ohm değerinden alçak olması beklenir. İdeal olan anot yatağı direnci ise 1 Ohm olarak belirlenmiştir. Eğer anot yatağı direnci 1 Ohm ise burada anot akımının toprağa rahat bir şekilde geçmesi sağlanır ve katodik koruma yapılan boru hattı ile koruma devresi tamamlanmış olacaktır.

#### 2.4.3.5. Transformatör/redresör ünitesi akım çevirici

Transformatör/redresör üniteleri boru hatlarının korozyondan katodik koruma yöntemi ile korunması sırasında dış bir akıma ihtiyaç olması durumunda şebekeden

sisteme dahil edilen trifeze ya da monofeze alternatif akım ilk olarak bir transformatör panosundan geçirilerek potansiyeli sistemin istediği seviyelere indirilir. Potansiyeli düşürülen bu akım sonra bir redresör ünitesine sokularak doğru akıma dönüşmesi sağlanır (Arkatodikkoruma.com, 2013). Şekil 2.67’de örnek bir T/R ünitesi verilmiştir.

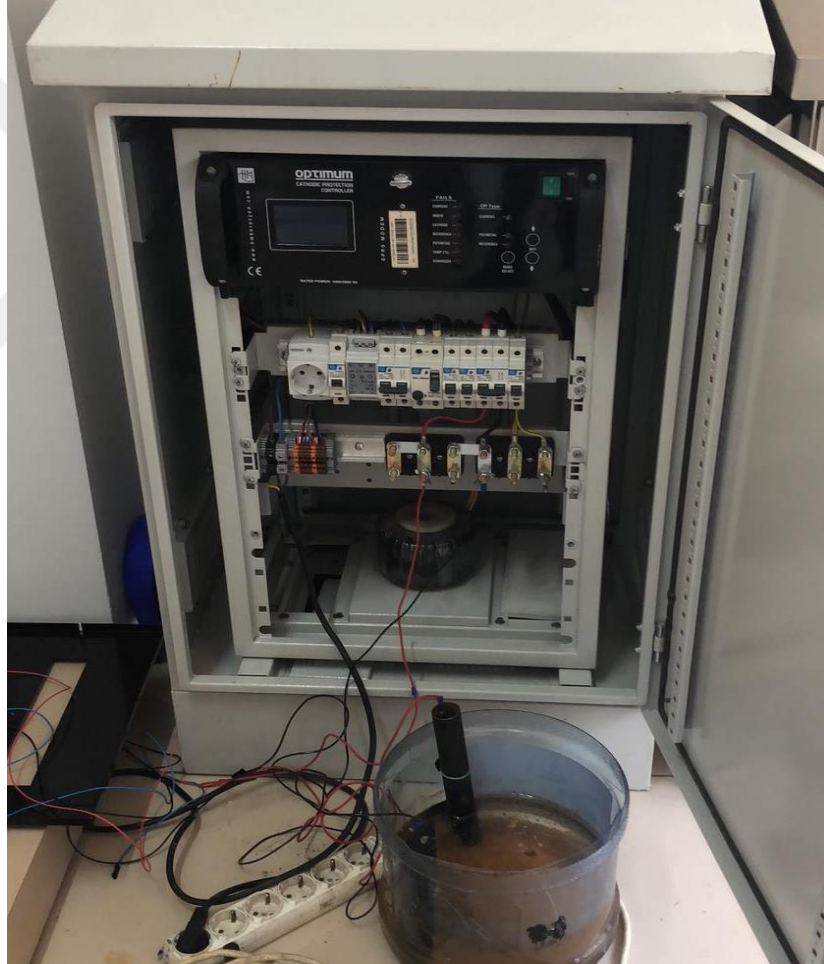


Şekil 2.67 Redresör panosu akım şeması

Sistemin ihtiyaç duyduğu akımın potansiyelini ayarlayabilmek adına T/R ünitesi üzerinde farklı kademelerde akımın potansiyelini istenilen potansiyele getirebileceğimiz potansiyel ayarları vardır. Tek faza sahip trafodan akım iletimi ağlanan transformatör redresör üniteleri trafodan gelen 220 V alternatif akımı 2 V ve 60 V değerleri arasında aralarında 2 V’luk kademeler halinde doğru akıma çevirirler. Standart transformatör redresör üniteleri 3 kVA gücünde 220 V primer girişli ve 10’ar V değerinde 6 kademe çıkışlı olarak üretimi gerçekleştirilir. Transformatörün son sargısından 2 Volt değer aralığının da 5 tane ayar kademesi çıkarılarak, transformatörden 2 - 60 Volt değerleri

arasında alternatif akım potansiyeline ulaşılır. Üretilen bu alternatif gerilim diyotların yardımıyla doğru akıma çevrilmektedir (İller Bankası, 2005).

Sisteme enerjinin girişinde 16 A gecikmeli tip otomatik sigorta, sistemin harcadığı enerjinin miktarını belirlemek için tek faza sahip sayaç, sistemin 2 dakika devre dışı bırakmak 3 dakika devrede olmasını sağlamak için aralıklı çalışma sistemine mekanizmasına sahip zaman rölesi ve kontaktör elemanları bulunur. Doğru akımın sahip olduğu potansiyeli ve akımını ölçmek için sekonder tarafında ampermetre ve voltmetre denilen ölçü aletleri vardır. Pozitif ve negatif uç kısımlarında ters gerilimlerin önüne geçebilmek için birer tane 50 Amper bıçaklı sigorta yerleştirilir. Aşağıdaki şekilde transformatör/redresör besleme ünitesi Şekil 2.68'de gösterilmektedir (İller Bankası, 2005).

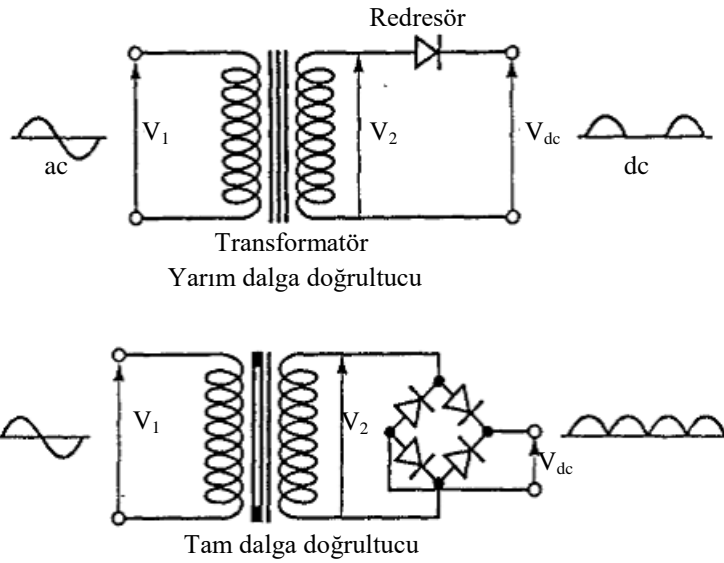


Şekil 2.68 T/R ünitesi

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde trafodan alınan alternatif akımı doğru akıma dönüşmesini sağlayan redresörlerde kullanılan diyotlar yarı iletken olarak

silisyum veya selenyumdur. Redresörler alternatif akımı yarım dalga veya tam dalga olarak doğru akıma dönüştürürler.

Şekil 2.69’da yarım dalga ve tam dalga redresör ünite tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.69 Yarım dalga ve tam dalga redresör ünite tipleri

Boru hatlarının dış akım kaynaklı katodik koruma sistemiyle korunmasında boru hattının ihtiyaç duyduğu akıma göre transformatör redresör ünitesinin tasarımı yapılır. Bu tür katodik koruma sistemlerinde boru hattına uygulanan akım noktasında boru/toprak potansiyelinin belli bir değerin altına inmemesine çok dikkat edilmelidir. Katodik koruma sistemlerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların sonucu olarak hidrojen atomları katodun etrafına birikir. Biriken bu hidrojenlerin akım çıkış bölgesindeki çıkışı 1200 mV değerinde başlar. Boru/toprak potansiyelinin akım drenaj bölgesinde 2000 mV değerinin üzerinde değerlere ulaşması durumundaysa katot üzerinde biriken hidrojenin boru kaplamasına zarar verdiği görülür. Hidrojenin boru kaplamalarına verdiği bu zararlardan dolayı akım drenaj kısmındaki maksimum gerilimin 1200 mV değerinde olması beklenir. Katodik koruma sistemi tasarım aşamasındayken de akım drenaj bölgesindeki gerilim 1200 mV olarak belirlenir.

Transformatör-redresör ünitelerinin verimi % 60-70 oranında olmaktadır. Yani bir trafodan alınan alternatif akım bu orandaki verim aralığında transformatör redresör ünitesinde doğru akıma çevrilebilir. Aşağıdaki formülde transformatör redresör ünitesinin verimini bulmak mümkün olacaktır (2.19) .

$$T/R \text{ Verimi}(\%) = \left( \frac{\text{DC çıkış gücü}}{\text{AC çıkış gücü}} \right) \times 100 \quad (2.19)$$

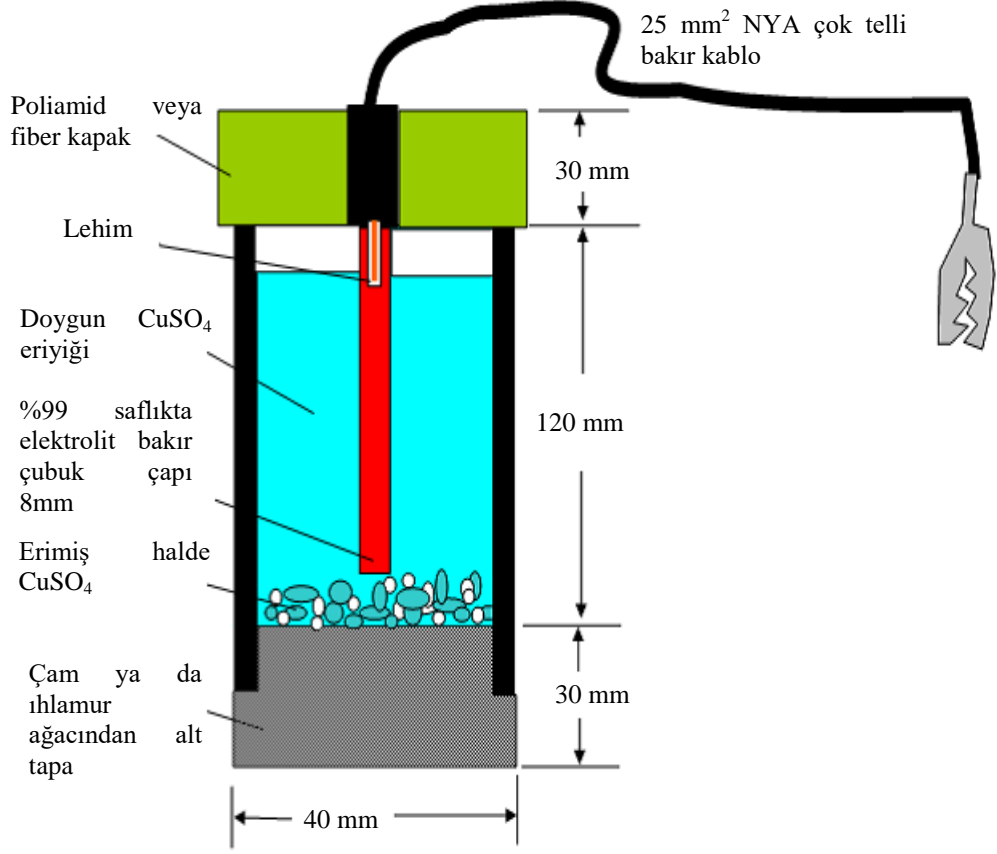
Doğru akımın çıkış gücü hesaplanırken, doğru akımın çıkışındaki voltaj değeri ile potansiyelinin çarpılmasıyla watt olarak bulunur. Alternatif akımın üniteye giriş gücü, girişte alternatif akım için konumlandırılan sayacın üzerinde okunan değerlere göre bulunur.

Toprak altında bulunan boru hattının olduğu kısımda gerçekleşen değışkenlere göre T/R ünitesi referans elektrotların yardımıyla boru hattının o an ihtiyaç duyduğu akımı tespit ederek akımı otomatik bir şekilde ayarlar ve sisteme gönderir. Bakır/bakır sülfat elektrotu referans elektrot olarak bu sistemlerde yaygın bir hizmet verir. Bu referans elektrotu genelde çelik yapılarda toprağın potansiyelini ölçülmesinde kullanıldığı görülür. Bakır sülfat referans elektrotu içi boş silindir şeklinde torba ya da plastik bir malzeme içerisine  $\text{CuSO}_4$  çözeltisinin doldurulması ve bu çözeltinin bulunduğu kısma da bakır çubuğun daldırılmasıyla imal edilir (Şekil 2.70).



Şekil 2.70 Cu/CuSO<sub>4</sub> torba tipi ve silindir tip referans elektrotları

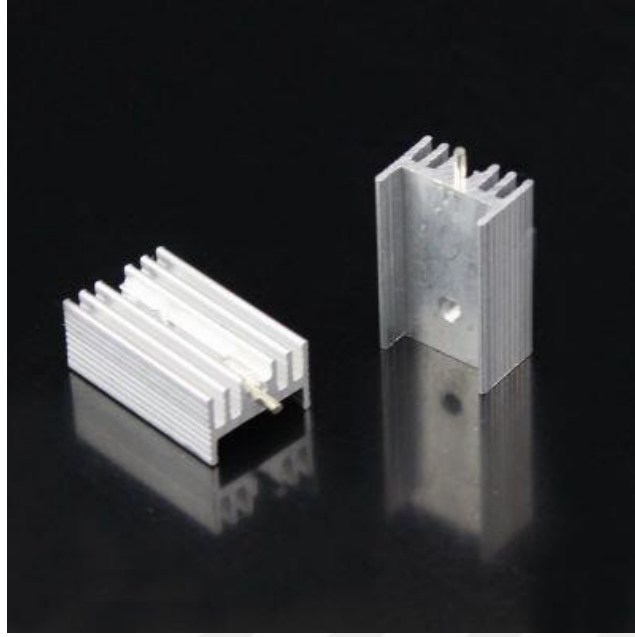
Şekil 2.71'de Cu/CuSO<sub>4</sub> referans elektrotunun iç kısmının şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.71 Cu/CuSO<sub>4</sub> referans elektrotu

Transformatör redresör üniteleri sistemin kullanılacağı ortamın çevre ve iklim koşullarına göre ya da bulunduğu bölgeye göre yağ ya da hava soğutmalı olarak imal edilir. Burada seçimin yapılmasında en önemli etken sistemin hangisiyle daha çabuk soğutulabileceğidir. Yağ soğutmalı sistemde, transformatör ve diyotlar transformatör yağı içerisinde kalmaktadır. Bu sayede elektriksel yalıtım ve soğutma aynı anda sağlanmış olur. Hava soğutmalı tip T/R ünitelerinde sistem ek bir soğutucu üniteye ihtiyaç duyar. Diyotların ısınmasını önlemek için soğutmanın alüminyum soğutma gövdeleriyle sağlanması gerekmektedir (Şekil 2.72).





Şekil 2.72 Diyot Al soğutucu gövde

Transformatör redresör ünitesinin panoları en düşük 500 mm yüksekliğe sahip beton bir kaidenin üzerine yerleştirilip kendiliğinden havalanabilecek bir yapıya sahip olmalıdır (TS 5141, 1987). Panonun üretildiği madde 2 mm bükme yassı çelik saçtan yapılmalıdır (İller Bankası, 2005).

#### **2.4.3.6. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin sağladığı avantajlar**

Galvanik anotlara göre düşük elektrik akım maliyetine sahiptir.

Elektrolitin yüksek dirence sahip olması durumunda doğru akımın potansiyeli yükseltilecek kolay bir şekilde katodik koruma uygulaması yapılabilir.

Proje hazırlanması esnasında göz ardı edilen bazı etkenler dolayısıyla sistemin ihtiyaç duyacağı akım miktarı değiştiği durumlarda T/R ünitesinden akım değiştirilebilir.

#### **2.4.3.7. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde oluşan dezavantajlar**

Elektrik hattının bulunmadığı bölgelerde bu sistemi uygulamak mümkün değildir. Fakat yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunduğu bölgelerde buradan elde edilen elektrik ile sistemi uygulamak mümkün olacaktır.

Anot yatağının çevresinde bulunan farklı metalik sistemlere üzerinde interferans etkisi oluşturur.

Korunacak olan boru hattına akımın ilk verildiği kısımda potansiyel yükselir. Bu potansiyel yükselmesinden dolayı borunun kaplandığı malzeme soyulur ve hidrojen

kırılmalığı olayları gerekleŒebilir. Akımın uygulandığı noktada aŒırı potansiyel yukselmeleri görülebilir.

Anodun yakınında bulunan yüzeylerde uygun devre ayarı yapılmazsa aŒırı voltaj sebebiyle metalin kaplamasında soyulmalar gerekleŒir.

Trafo nitesinin negatif ucu katoda pozitif ucu anoda bağlanmalıdır. Bu durumu uygularken bir yanlışlık yapılması durumunda korunan boru hattı çok kısa sürede korozyona uğrayarak aŒırır.





### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Katodik Koruma Sistemlerinde Hesap Yöntemleri

Bu bölümde, katodik koruma sisteminin uygulanacağı boru hattının bulunduğu zemin de çeşitli etüt çalışmaları yapılarak ve sistemin büyüklüğüne göre ihtiyaç duyulacak olan katodik koruma çeşidinin tasarımının yapılması konusunda yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bu yapılan araştırmalar sonucunda boru hattını en iyi şekilde koruyabilecek olan katodik koruma sisteminin akım ihtiyacının galvanik anotla mı ya da dış bir akıma kaynağıyla mı sağlanacağı ve bunlardan biri seçildikten sonra sistem tasarımının nasıl belirleneceği incelenecektir.

##### 3.1.1. Zemin etüt çalışmaları

Katodik koruma yapılan boru hattının korozyona uğrama hızının en önemli etkeni boru hattının bulunduğu zeminin karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişir. Zeminde belli ölçümler yapılarak çıkan sonuçlar ışığında zeminin sahip olduğu korozyon derecesi belirlenir ve bu duruma göre sistem tasarım parametreleri belirlenir.

##### 3.1.1.1. Zemin rezistivitesinin (özgül direncinin) belirlenmesi

Toprak zeminin sahip olduğu özgül direncin bulunması için arazinin değişiklik gösterdiği kısımlarda minimum 100 m, maksimum 250 metre aralıkla zemin özgül direnç ölçümü yapılır. Arazinin düz bir şekil aldığı kısımlardaysa 500 metre veya 1000 metre aralıklarla toprak zemin özgül direnç ölçümlerinin yapılması yeterli olacaktır (TS 5141, 1987).

Birbirini takip eden iki zemin özgül direnç ölçümünün arasındaki fark 2 katına kadar değişiyorsa ara bir noktadan zemin özgül direnç ölçümü yapmak gereklidir. Yapılan bu ölçüm sonucunda ise zeminin sahip olduğu korozyon derecesi belirlenir ve ortalama zemin özgül direnci değeri katodik koruma sisteminde tasarım hesaplamasında kullanılmaktadır. Toprak zeminin sahip olduğu özgül dirence göre çevrenin korozyon dereceleri aşağıdaki Tablo 3.1’de gösterilmiştir (Arkatodikkoruma.com, 2013).

**Tablo 3.1** Zeminin sahip olduğu elektriksel özgül dirence göre korozyon dereceleri

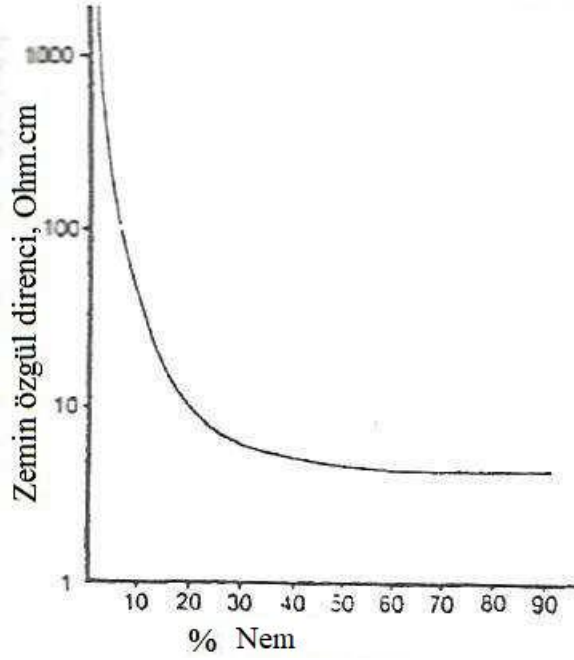
Zemin Elektrik Özgül Direnci ( $\rho$ ) (ohm x cm)	Zeminin Korozyon Özelliği	Korozyon Hızı (MPY)
$10000 < \rho$	Az Korozyon	1
$3000 < \rho < 10000$	Orta Korozyon	4-7
$1000 < \rho < 3000$	Korozyon	7-10
$\rho < 1000$	Çok Korozyon	20-30

Ortalama zemin özgül direncinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik (3.1)'de kullanılmaktadır (İller Bankası, 2005).

$$\rho_{ort} = \frac{\rho_{top} - \left( \frac{\rho_{maks} + \rho_{min}}{2} \right)}{n-1} \quad (3.1)$$

- $\rho_{top}$ : Ölçülen zemin özgül direnç değerlerinin toplamı (Ohm.cm)
- $\rho_{ort}$ : Ortalama zemin özgül direnci (Ohm.cm)
- $\rho_{maks}$ : Ölçülen en fazla zeminin sahip olduğu özgül direnç (Ohm.cm)
- $\rho_{min}$ : Ölçülen en düşük zeminin sahip olduğu özgül direnç (Ohm.cm)

Çevrenin sahip olduğu nem oranı ile toprağın zemin özgül direnci ters orantılıdır. Zemin özgül direncinin nem oranına göre değişimi Şekil 3.1'de ki grafikte gösterilmiştir (Yalçın ve Koç, 1999).



Şekil 3.1 Zemin özgül direncin nem oranına bağlı olarak gösterdiği değişim

Toprak zeminin sahip olduğu özgül direnç sıcaklık ile de ters orantıya sahiptir. 0 derecenin altındaki sıcaklık değerlerinde özgül direncin birden yükseldiği görülür. Buna sebep ise toprak içerisinde bulunan suyun 0 derecede donmasının gerçekleşmesidir. Bundan dolayı toprağın zemin özgül direnç ölçümleri yapıldığı sırada sıcaklık değerinin de kaydedilmesi gerekmektedir. 15 °C de ölçülen toprak zeminin özgül direnç değeri ile bir t °C' deki toprak zemin özgül direncinin arasında ilişki aşağıdaki bağıntı 3.2'de verilmiştir (Yalçın ve Koç, 1999).

$$\rho_t = \rho_{15} \times \frac{40}{25+t} \quad (3.2)$$

- $\rho_t$ : t °C'de ki toprak zemin özgül direnç (Ohm.cm)
- $\rho_{15}$ : 15 °C'de ki toprak zemin özgül direnç (Ohm.cm)
- t: Sıcaklık (°C)

Wenner dört elektrot yöntemi: Bu ölçme metodunda toprak zemin altına belirli aralıklar ile elektrotlar yerleştirilir. En dış kısma konumlandırılan elektrotlarla ( $C_1$  ve  $C_2$ ) toprak zemine akım verilir (Şekil 3.2). Verilen bu akım zemin içerisinde potansiyel bir fark yaratır. Bu yaratmış olduğu potansiyel fark iç kısımda kalan iki elektrot ile ölçülür ( $P_1$  ve  $P_2$ ). Ölçüm yapıldıktan sonra ohm kanunu ile  $R=V/I$  hesaplanır.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \text{ (Ohm.cm)} \quad (3.3)$$

- $\rho$ : Rezistivite (Ohm.cm)
- a: Elektrotlar arası mesafe (cm)
- R: Rezistivite aleti üzerinden ölçülen değer (Ohm) ( $\Omega$ )
- Toprak rezistivite aletinin kalibrasyonu minimum 1 yıldır.

Ortalama toprak rezistivitesi aritmetik ve logaritmik ortalama alınarak hesaplanır.

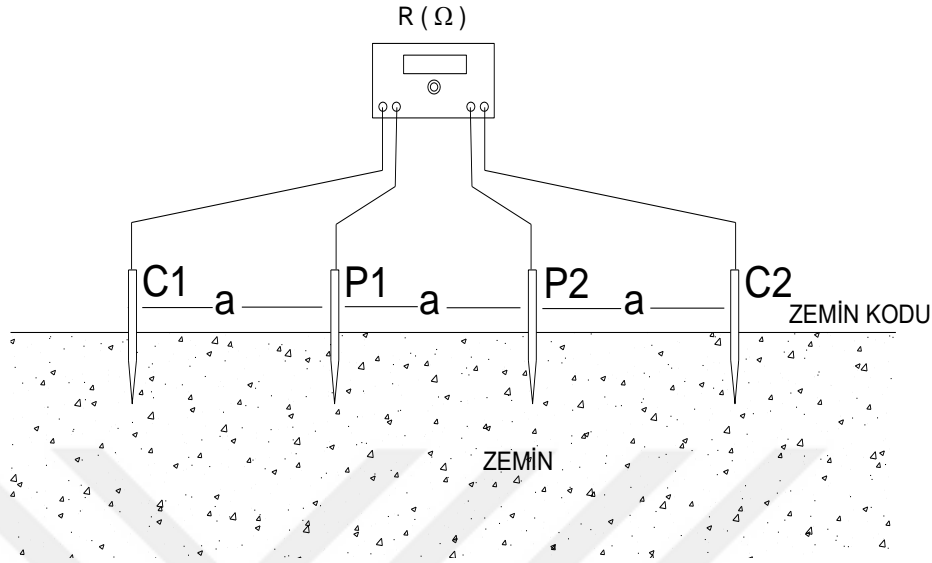
Aritmetik Ortalama:

$$\rho_{ort} = \frac{\sum \rho - \frac{(\rho_{max} + \rho_{min})}{2}}{N-1} \quad (3.4)$$

- $\rho_{ort}$ : Ortalama toprak rezistivitesi
- $\sum \rho$ : Toprak rezistivitesi toplamları
- $\rho_{max}$ : En yüksek rezistivite değeri
- $\rho_{min}$ : En düşük rezistivite değeri
- N: Alınan rezistivite sayısı

Logaritmik ortalama zemin direnci, boru hattının güzergâhı bölgesel olarak farklı zemin yapısına sahip arazilerden geçmektedir. Boru hattı boyunca heterojen bir zemin dağılımına sahip olan arazide ölçülen bazı pik direnç değerleri, aritmetik olarak hesaplanan ortalama direnç değerini yüksek değerlere doğru sürüklemektedir. Bu ölçülen pik değerlerin ortalamaya olan etkisini azaltmak ve boru hattını daha iyi karakterize hale getirmek amacıyla logaritmik ortalama değeri hesaplanır. Bu işlem her

bir rezistivite değerinin logaritmasının alınarak aritmetik ortalaması yapılması ve sonucunda ters logaritma ile gerçek değere ulaşılması sağlanır.

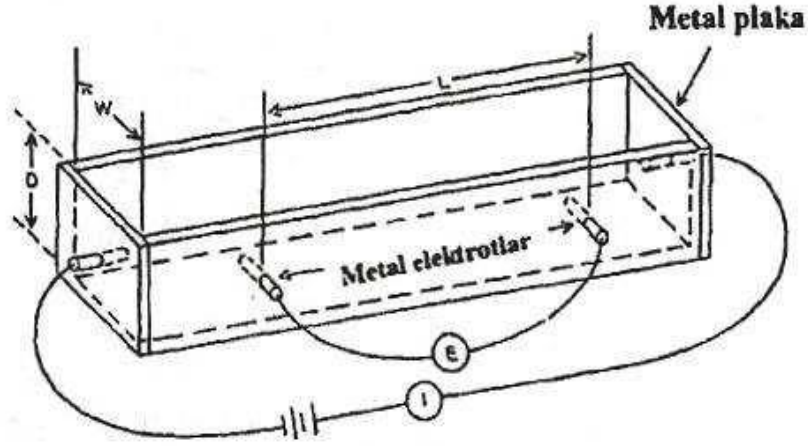


Şekil 3.2 Wenner dört elektrot sistemi

Şekil 3.2’de gösterilen wenner dört elektrot sisteminde kullanılacak olan elektrotlar, katodik korunan boru hatlarına dik bir pozisyonda yerleştirilir. Boruya paralel olarak konumlandırılmaları, gerçek özgül değerinden düşük bir direnç ölçmemizi sağlar. Elektrotların toprak içerisinde kalan kısmının derinlik mesafesinin 1/20’si alınmalıdır. Nemsiz kuru havalarda düzgün ölçüm değerleri alabilmek için elektrotların sulanarak geçiş dirençlerinin düşürülmesi ve temas ettikleri yüzeylerin artırılması sağlanmalıdır. Boru hatları genel olarak 160 cm derine gömüldüklerinden dolayı a değeri 160 cm alınır. Bu değere göre ise  $2 \times \pi \times a = 2 \times \pi \times 160 = 1000$  olur. Okunan R değeri 1000 ile çarpılması sorucunda zeminin özgül direnci hesaplanır (İller Bankası, 2005).

Toprak kutusu ölçüm metodu: Toprak özgül direnci korozyona etkisi bulunan önemli bir faktör olup zemin özgül direncinin doğru bir şekilde ölçülmesi sistemin sağlıklı ilerleyişi bakımından oldukça önemlidir. Toprağın zemin özgül direnci aşağı değerlere indikçe korunan malzemenin de korozyona uğrama hızı yükselecektir. Toprağın nem oranı yükseldikçe zemin özgül direnci düşük değerlere iner, azaldıkça ise zemin özgül direnci yüksek değerler alır. Toprağın sahip olduğu özgül direnç kısa mesafelerde ve derinliklere inildikçe değişiklikler gözlenir. Açıklanan bu sebeplerden dolayı ölçü numunesinin en doğru kısımdan alınması gereklidir. Bu sistemin çalışma prensibi dört elektrotlu wenner metodu ile benzerlik gösterir. Bu ölçüm yönteminde de

4 adet elektrot toprak ile temas ettirilir. Bu elektrotlardan iki adeti taban kısımda diğer ikisi ise kutunun yan taraflarına konumlandırılır. Kutunun yan kısımlarına konumlandırılan elektrotlara akım verilerek taban kısımda bulunan diğer iki adet elektrot ile aralarında gerçekleşen potansiyel değer okunması sağlanır. Bu ölçüm metodunda verilen akım ve ölçülen potansiyel değerlerine aşağıda verilen formül (3.5)'te yerlerine konulduğu zaman toprağın sahip olduğu özgül direnci hesaplanabilir (Yalçın ve Koç, 1999; Akad.net, 2013). Şekil 3.3'te toprak kutusu gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Toprak kutusu

$$\rho = R \times \frac{W \times D}{L} \quad (3.5)$$

- $\rho$ : Zeminin elektriksel özgül direnci (Ohm.cm)
- R: Ölçülen direnç değeri (Ohm) ( $\Omega$ )
- L: Ölçüm noktaları arasındaki mesafe (cm)
- W, D: Dikdörtgenin kenar uzaklıkları (cm)

### 3.1.2. Zemin pH değerinin belirlenmesi

Katodik olarak korunacak olan boru hattının yerleştirildiği toprak zeminin kimyasal yapısının öğrenmek amacıyla dijital göstergeli pH metre ya da özel olarak üretilmiş olan turnusol kâğıdı adı verilen gösterge kâğıtlar kullanılarak zeminin pH değeri ölçülebilir. Suyu doyurulmuş topraklarda pH değeri ölçümü yapmak mümkün olacaktır (Akad.net, 2013).

Ölçüm yapabilmek için toprak numunenin 15 ila 20 cm arasındaki derinlikten çıkarılması gerekmektedir. Alınan numuneler cam bir kap içine konularak saf su ile plastik kıvamına gelecek şekilde karıştırılır, bu karışım 12 saat beklemeye alınarak

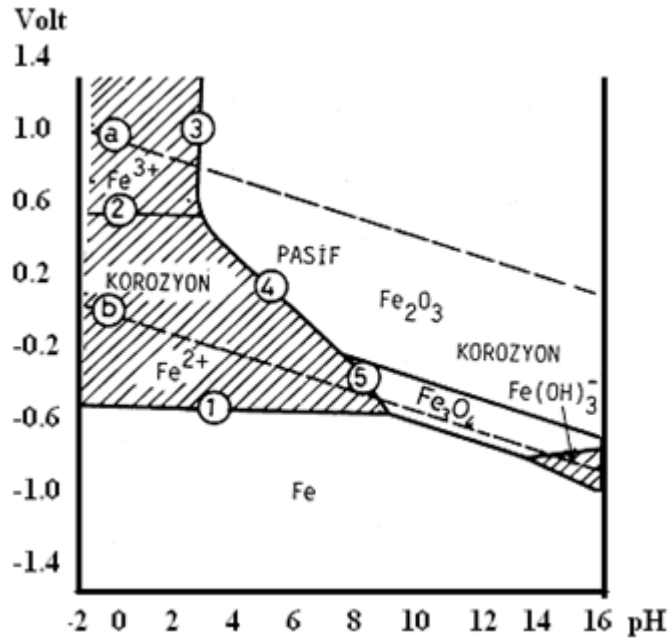
içerisinde bulunan tuzun erimesi sağlanarak pH ölçümü gerçekleştirilir. pH metre ya da turnusol kâğıdı ile pH değeri ölçülerek asitlik baziklik derecesi belirlenebilir (İller Bankası, 2005). Tablo 3.2’de pH değerine göre asitlik baziklik durumu verilmiştir.

**Tablo 3.2** pH değerine göre toprak zeminin asitlik baziklik durumu

pH Değeri	Özellik
pH<7	Asidik
pH=7	Nötr
pH>7	Bazik

pH derecesini baz alarak hazırlanmış demir-su sistemi için Pourbaix diyagramı Şekil 3.4’deki gibidir. Okunan pH değerinin doğal potansiyelde (500 mV) 10-13 aralığında olması durumunda demir boru yapısının korozyona uğramayacağı kabul edilir.

Kilometre başına alınmış olan toprak numunelerle pH ölçümü yapılır. Alınan numuneler % 20 oranında nemlendirilerek pH-metre denilen ölçü aletiyle ölçülerek ölçülen değer kaydedilir. Buradan çıkar değerler ile toprağın asitlik baziklik derecesine bakılarak asidik ya da bazik olduğu belirlenir. Boru hattının geçtiği güzergâhın karakteristik özelliği bu yöntemle de belirlenebilir. Demirin Potansiyel - PH diyagramı göz önüne alınarak boru hattının hangi bölgede olduğuna bakılır ve katodik koruma sistem dizaynı ona göre yapılır.



**Şekil 3.4** Pourbaix diyagramı

Yukarıdaki taralı bölge demirin (Fe) korozyona uğradığı, boş olan kısımlar da korozyona uğramadığı bağışıklık kazandığı bölgelerdir (Şekil 3.4).

### 3.1.3. Zemin redoks potansiyelinin belirlenmesi

Bir toprak zemin içerisinde anaerobik korozyon oluşum durumunun gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini, tasarım yapılacak arazinin redoks potansiyelini ölçmek ile anlamak mümkündür. Boru hattı güzergâhının üzerinde her 1 kilometre başına zeminden alınan toprak numunelerinin zemin redoks potansiyeli ölçümü yapılır. Anaerobik korozyon olayı, balçık ve bataklık gibi anaerobik toprak zeminlerde yaşayan mikroorganizma türlerinin neden olduğu korozyon olayı olmaktadır. Bu mikroorganizmalar en önemli sülfatları sülfüre dönüştüren canlılardır. Anaerobik çevrelerde, sülfatlı bileşiklerdeki oksijeni yakarak sülfürlü bileşikler haline indirgerler. Ayrıca boru yüzeyindeki sülfatların yok olması durumunda, katodik tepkimeler esnasında ortaya çıkan hidrojen atomları harcanarak boru yüzeyinde depolarizasyona neden olur ve gerçekleşen bu olaylar çerçevesinde korozyon hızı artar katodik koruma sisteminin akım ihtiyacı yükselir.

Zeminin redoks potansiyeli, zemin içerisine daldırılan platin elektrotunun bakır/bakır sülfat referans elektrotuna göre potansiyel değeri ölçülerek aşağıdaki formül ile hesaplanır (TS 5141, 1987).

$$E_{red} = E_p + E + 60 (\text{pH} - 7) \quad (3.6)$$

- $E_{red}$ : Zemin redoks potansiyel değeri (mV)
- $E_p$ : Platin elektrotunun zemin içinde sahip olduğu potansiyel (mV)
- $E$ : Kullanılan referans elektrotun standart hidrojen elektrotuna göre potansiyeli (mV) (Doygun bakır/bakır sülfat için 316 mV)

Redoks potansiyeline göre toprak zeminde görülen korozif özellik Tablo 3.3'te verilmiştir (TS 5141, 1987).

**Tablo 3.3** Redoks potansiyeline göre toprak zemin koroziflik durumu

Redoks Potansiyeli ( $E_{red}$ ) (mV)	Zeminin Koroziflik Özelliği
$E_{red} < 100$	Çok Korozif
$100 < E_{red} < 200$	Korozif
$200 < E_{red} < 400$	Orta Korozif
$400 < E_{red}$	Az Korozif

### 3.1.4. Boru hattının karakteristik özelliklerinin belirlenmesi

Katodik koruma sistemini kurulum aşamasında korunacak olan boru hattının sahip olduğu bazı karakteristik özelliklerini bilerek sistemi katodik koruma sisteminin türünü belirlemek gerekir. Bunu belirlememizde aşağıdaki karakteristik özelliklerin bilinmesi gerekecektir.

- Katodik olarak korumaya alınacak sistemin sahip olduğu yüzey alanı

$$A=\pi \times D \times L \quad (3.7)$$

A: Katodik olarak korunacak olan sistemin yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

D: Çap (m)

L: Korunan sistemin uzunluğu (m)

- Katodik koruma sağlanacak boru hattının uzunluğu (L)
- Katodik koruma sağlanacak boru hattının çapı (D)
- Boru hattının et kalınlığı (t)
- Boru hattı sisteminin sahip olduğu elektriksel direnç
- Sistem korumasında kullanılan kaplama kalınlığı (k)

Tablo 3.4'te PE kaplı çelik boruların en düşük kaplama kalınlıkları verilmiştir.

**Tablo 3.4** PE kaplı çelik boruların en düşük kaplama kalınlıkları (DSİ. 2008)

Boru Çapı (mm)	Minimum Kaplama Kalınlığı (mm)
DN 100 ve daha altı	1,8
DN 100 ile DN 250 arası	2,0
DN 250 ile DN 500 arası	2,2
DN 500 ile DN 800 arası	2,5
DN 800 ve daha üstü	3,0

- Uygulanan kaplamanın türü (PE, bitüm, vb.)
- Kaplamanın sahip olduğu direnç (R<sub>k</sub>)

Kaplamanın sahip olduğu direnç aşağıdaki formül ile bulunur (3.8).

$$R_K = 10^{-5} \times \rho_K \times s \quad (3.8)$$

R<sub>K</sub>: Kaplamanın direnci (Ohm.m<sup>2</sup>)

ρ<sub>K</sub>: Kaplamanın sahip olduğu özgül direnç (Ohm.cm)

s: Kaplamanın kalınlığı (mm)



**Tablo 3.5** Kaplama malzemesine göre kaplamaların direnç değerleri

Kaplama Malzemesi	$\rho_K$ (ohm.cm)	s (mm)	$R_K$ (ohm.m <sup>2</sup> )	$R_{KI}$ (ohm.m <sup>2</sup> )	s (mm)	$R_{KC}$ (ohm.m <sup>2</sup> )
PE	10 <sup>18</sup>	2	2x10 <sup>13</sup>	10 <sup>11</sup>	2-4	-10 <sup>5</sup>
Bitüm	>10 <sup>14</sup>	4	4x10 <sup>9</sup>	3x10 <sup>5</sup>	4-10	-10 <sup>4</sup>
EP	10 <sup>15</sup>	0,4	4x10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	0,4	-10 <sup>4</sup>
PUR	3x10 <sup>14</sup>	2	6x10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	2,5	-

Yukarıdaki Tablo 3.5’de  $R_K$  değerleri bir önceki sayfada verilen formüle göre hesaplanan değerler olmaktadır (3.8).  $R_{KI}$  sütununda yazan değerlerde tahribata uğramamış halde bulunan doğalgaz boru hatlarının koruma yapılacak olan arazideki ölçülen direnç değerleri olmaktadır. Bu değerler genelde malzemeyi üreten üretici tarafından verilen değerlerdir.  $R_{KC}$  boru hatlarının montajı esnasında malzemenin yüzeyinde gerçekleşen tahribat sonrası ve çevrenin özgül direncine bağlı olarak kaplama direncinin aldığı değerdir. Boru hattı uzadıkça  $R_{KI}$  ile  $R_{KC}$  arasındaki fark yüksek değerler alır.

Aşağıdaki tabloda çelik boruların kaplamasında kullanılan malzemenin bulunduğu toprak zeminin özgül direncine göre aldığı değerlere Tablo 3.6’da verilmiştir (Odabaşı, 2005).

**Tablo 3.6** Kaplamaların zemin özgül dirençlerine göre gösterdikleri dirençler

Ortalama toprak özgül direnci (Ohm.cm)	$R_{KC}$ kaplama direnci (Ohm.m <sup>2</sup> )
>10000	12000
4000-10000	6000
2500-4000	5000
<2500	3000

Boru hattının uzunluk açısından sahip olacağı elektriksel direnç (3.9)'da ki formül ile hesaplanabilir.

$$r = \rho_B \times (L/A) \quad (3.9)$$

r: Uzunluk açısından elektriksel direnç (Ohm)

$\rho_B$ : Korunacak maddenin özgül direnci (Ohm.m) (çelik için  $1,8 \times 10^{-7}$  Ohm.m)

A: Kesit Alanı ( $m^2$ )

L: Uzunluk

### 3.1.5. Katodik korumada akım ihtiyacının belirlenmesi

Katodik koruma uygulaması esnasında yeteri derecede sistemi korumak için sisteme bir akım uygulamak gerekir. Uygulanan bu akıma katodik koruma akım ihtiyacı denir. Katodik koruma sistemleri kurulumunda önce proje hazırlanmadan önce hesaplamalarda kullanılacak olan sistem akım ihtiyacının belirlenmesi gerekmektedir. Bu hesaplamalar yapılmadığında sistemde kullanılacak olan anot miktarları başta olmak üzere sistemde kullanılacak diğer malzemelerinin tür ve kullanılacağı adetler net bir şekilde belirlenemez (Gülensoy, 2006).

Sisteme en uygun akım ihtiyacı deneysel çalışmalarla bulunabilir. Proje yapım aşamasında iken sistem tamamen bitmemiş olduğundan dolayı proje yapım aşamasındayken deneysel olarak akım ihtiyacı belirlemek mümkün olmayacaktır. Bu yöntem yerine boru hattının karakteristik özellikleri ile çeşitli grafik kaynakları ile birlikte tahmini hesaplamalar ile katodik koruma akım ihtiyacı belirlenebilir ve buna göre sistem tasarımı uygulanabilir.

#### 3.1.5.1. Katodik koruma sistemlerinin ihtiyaç duyduğu akımın tahmini yöntem ile belirlenmesi

Çelik doğalgaz boru hatlarının korozif ortamlardan korunması amacıyla literatür de akım ihtiyacı değerleri çeliğin kaplamalı ya da kaplamasız hali ile listelenerek verilmiştir. Toprak altında kalan çelik borunun ihtiyacı olan akım kaplama cinsinin kalitesine ve kaplamanın direncine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Çelik borunun içerisinde olduğu toprak zeminin sahip olduğu direnç uygulanan kaplamanın direncinden daha küçük değerlere sahip olduğu için hesaplamalarda ihmal edilir.

Tablo 3.7’de kaplamasız çelik boruların zemin özgül direnci baz alınarak ortalama akım ihtiyacı değerleri verilmiştir. Tablo 3.8’de ise Çeşitli çevrelere göre ihtiyaç duyulan göre ortalama akım değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.7** Kaplamasız çelik boruların zemin özgül direnci baz alınarak ortalama akım ihtiyacı (TS 5141, 1987)

Zeminin Cinsi	Zemin Özgül Direnci ( $\rho$ ) (Ohm.cm)	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m <sup>2</sup> )
Çok korozif	$\rho < 1000$	$20 < i$
Korozif	$1000 < \rho < 3000$	$5 < i < 20$
Orta korozif	$3000 < \rho < 10000$	$0,1 < i < 5$
Az korozif	$\rho > 10000$	$i < 0,1$

**Tablo 3.8** Çeşitli çevrelere ihtiyaç duyulan göre ortalama akım (Koç, Yıldırım ve Ray 2004)

Bulunulan Çevre	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m <sup>2</sup> )
Hareketli deniz suyu içerisinde kaplamasız çelik	100 – 160
Hareketsiz deniz suyu içerisinde korumasız çelik	55 – 85
Deniz dibi toprak altındaki kaplamasız çelik	20 – 30
Nemli zemin içerisindeki kaplamasız çelik	10 – 20
Su veya toprak altında zayıf kaplamalı çelik	1 – 2
Su ya da toprak altında kaliteli kaplanmış çelik	0,05
Su ya da toprak altında PE ile kaplanmış çelik	0,005
Anaerobik bakterili toprak altında kaplamasız çelik	20 – 40
Beton içerisindeki kaplamasız çelik	15 – 55

Çelik boruya kaplanan kaplama direnci belirlenirken Kaplama Tablo 3.6’da ki zeminin sahip olduğu özgül dirence göre kaplama direnç değerleri kullanılabilir gibi, deneysel hesap yöntemleri ile de kaplamanın direnci elde edilir. Bunu belirleyebilmek için bir deney düzeneği kurmak gerekir. Kurulan bu deney düzeneğinde boru hattının orta kısmından akım uygulayarak bu hat üzerinde bulunan minimum 3 ölçüm istasyonundan boru/zemin potansiyeli ölçülür. Sisteme verilen akımın akım

kaynağından değişmeyecek şekilde gelmesi gerekir. Sisteme verilen akımın şiddeti boru/zemin potansiyelini minimum -850 mVolt düzeyine getirebilmektedir. Akımın gerçekleştiği devreyi 30 saniye açık, 15 saniye kapalı tutacak otomatik bir akım kesici konumlandırılmalıdır. Sistemde bulunan tüm ölçüm istasyonlarında açık ve kapalı potansiyel değerleri aynı anda ölçülmelidir. Bu ölçüm değerler açık/kapalı potansiyel farkları alınarak her bir istasyonun potansiyelindeki değişimi belirlememizi sağlar. Çelik boru hatlarına verilen akımın potansiyel değişimi, sırasında ölçülen tüm potansiyel farkların ortalaması alınarak bulunur. Bulunan potansiyel değişimin, boru hattına uygulanan akıma oranı bize boru kaplama oranını verecektir (Koç, Yıldırım ve Ray 2004).

Boru hattına uygulanan kaplamanın direncine göre akım ihtiyacı Tablo 3.9'da verilmiştir. Kaplamanın türüne göre akım ihtiyacı da Tablo 3.10'da verilmiştir.

**Tablo 3.9** Kaplama direncine göre ihtiyaç duyulan ortalama akım (Yalçın ve Koç, 1999)

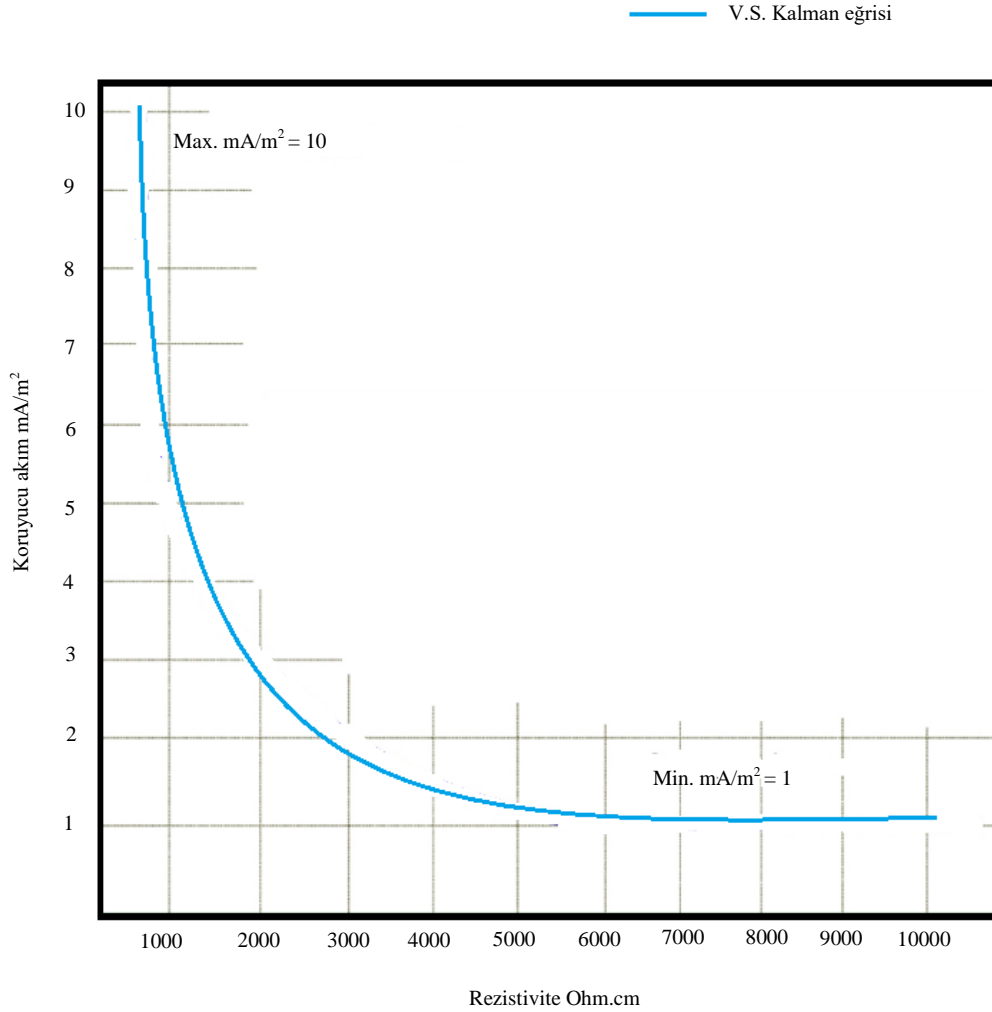
Kaplama Kalitesi	Kaplama Direnci (Ohm.m <sup>2</sup> )	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m <sup>2</sup> )
Çok zayıf	100 – 200	1 – 2
Zayıf	200 – 500	0,5 – 1
Orta	500 – 1000	0,1 – 0,5
İyi	1000 – 2000	0,05 – 0,1
Çok iyi	2000 – 10000	0,01 – 0,05
Mükemmel	10000'den büyük	0,01'den küçük

**Tablo 3.10** Kaplama türüne göre ihtiyaç duyulan akım (Odabaşı, 2005)

Kaplama türü	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m <sup>2</sup> )
Bitüm sıcak kaplama	0,5 – 2,0
Bitüm emdirilmiş tek sargı kaplama	0,2 – 0,5
Bitüm ile emdirilmiş tek kat cam elyaf sargılı kaplama	0,05 – 0,2
Bitüm ile emdirilmiş çift kat cam elyaf sargılı kaplama	0,005 – 0,05
Plastik ya da PE kaplamalar	0,005
Epoksi ya da yüksek performanslı kaplama	0,01 – 0,05
Eski boya kaplama	1–3
Eski asfalt kaplamalar veya bozulmuş kaplamalar	0,5 – 3,5
Beton içerisinde kaplamasız çelik	15 – 55

### 3.1.5.2. Boru hattında ihtiyaç duyulan akımın v.s. kalman eğrisi yardımıyla tayini

Katodik koruma sisteminde boru hattını korumak için ihtiyaç duyulan akımı belirlemede kolay bir yöntemdir. Ortalama toprak rezistivitesi baz alınarak eğride bulunan ihtiyaç duyulan akım miktarı değeri kaplamasız çelik borular için hazırlanmış olup kaplamanın türüne göre kaplama tür katsayısı ile çarpılarak  $1 \text{ m}^2$ 'deki korunan çelik boru hattının ihtiyaç duyduğu akım belirlenmiş olur.



Şekil 3.5 V.S. kalman eğrisi

Şekil 3.5'te verilen V.S. Kalman eğrisinden bulunan koruma akım değerinin çarpılacağı boru kaplamasına göre değişiklik gösteren kaplama tür katsayıları aşağıdaki çizelgede görebiliriz (Tablo 3.11).

**Tablo 3.11** Kaplamanın türüne göre kaplama tür katsayıları (Yavuz, 2001)

Kaplama Türü	Kaplama tür katsayısı
Kaplamasız yeni boru hattı	1
Kaplamasız eski boru hattı	3
PE kaplı yeni boru hattı	1/8
PE kaplı eski boru hattı	1/2
Bitüm kaplı yeni boru hattı	1/3

**Tablo 3.12** V.S. kalman eğrisi baz alınarak hazırlanmış rezistivite ve akım değerleri (Yavuz, 2001)

Özgül Direnç, $\rho$ (Ohm.cm)	Akım İhtiyacı ( $\text{mA/m}^2$ )
$\rho < 500$	10
$500 \leq \rho < 600$	9
$600 \leq \rho < 750$	7
$750 \leq \rho < 1000$	5
$1000 \leq \rho < 1250$	5
$1250 \leq \rho < 1500$	3,7
$1500 \leq \rho < 1750$	3,5
$1750 \leq \rho < 2000$	3
$2000 \leq \rho < 2250$	2,8
$2250 \leq \rho < 2500$	2,5
$2500 \leq \rho < 2750$	2,3
$2750 \leq \rho < 3000$	2,1
$3000 \leq \rho < 3250$	2
$3250 \leq \rho < 3500$	1,8
$3500 \leq \rho < 3750$	1,7
$3750 \leq \rho < 4000$	1,6
$4000 \leq \rho < 4250$	1,5
$4250 \leq \rho < 4500$	1,4
$4500 \leq \rho < 4750$	1,2
$4750 \leq \rho < 5000$	1,15
$5000 \leq \rho < 5500$	1,1
$5500 \leq \rho < 5750$	1
$5750 \leq \rho < 6000$	0,95
$6000 \leq \rho < 6250$	0,9
$6250 \leq \rho$	0,8

V.S. Kalman eğrisi değerleriyle hazırlanmış Tablo 3.12 koruma akım ihtiyacının belirlenmesinde bizlere yardımcı olur.

### 3.1.5.3. Akım ihtiyacının hesaplanması

Katodik koruma projesi hazırlanması esnasında sistemin ihtiyaç duyacağı akımın tahmini yöntemlerle ya da grafiksel yöntemler ile bulunup proje tamamlanmalıdır. Galvanik anotlarla yapılan katodik koruma devresinde boru hattının akım ihtiyacı için tahmin yöntemi ya da V.S. Kalman eğrisi kullanılarak bulunur. Bu sistemler için en çok tercih edilen akım ihtiyacı belirleme yöntemleri bunlardır. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde ise akım ihtiyacı hesaplamasında kullanılan daha gelişmiş sistemler mevcuttur. Bu yöntemler sayesinde dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin koruyabileceği en fazla mesafedeki ihtiyaç duyulan akım ihtiyacı basit bir şekilde bulunur. Özellikle boru hatlarına katodik koruma uygulayan firmalar bu tespit yöntemlerini fazlaca kullanır.

Doğalgaz boru hattına belirlenmiş bir noktadan akım verildiğinde, Verilen akımın olduğu bölgede boru/zemin potansiyeli en yüksek değeri alır. Bu bölgeden boruya doğru ilerledikçe ise akımın şiddeti ve boru/zemin potansiyeli azalmaya başlar. Boruya verilen akımın bölgesinden uzaklaştıkça akımın boru üzerinde azalmasının, borunun uzaklık direncine, yapılan kaplamanın direncine ya da borunun bulunduğu toprağın rezistivitesine bağlıdır (Yalçın ve Koç, 1999).

$$a = \sqrt{\frac{r}{R_{KC1}}} \quad (3.10)$$

- a: Sönüm sabiti ( $m^{-1}$ )
- r: 1 metre borudaki uzunlamasına direnç (Ohm/m)
- $R_{KC1}$ : 1 metre borudaki kaplama direnci (Ohm.m)

Yukarıdaki Sönüm sabiti formülü (3.10) akım ihtiyacını ve koruma akımı ihtiyacını belirlememizde kullanacağımız bir hesaplama yöntemimizdir.

1 metre borunun uzunlamasına sahip olduğu direnç aşağıdaki formül ile bulunur (3.11).

$$R = \frac{\rho_B}{\pi \times (D-t) \times t} \quad (3.11)$$

- $\rho_B$ : Boru hattının özgül direnci (Ohm.m) (çelik için  $1,8 \times 10^{-7}$  Ohm.m)

- D: Boru hattının çapı (m)
- t: Borunun et kalınlığı (m)

1 metre boruya yapılan kaplamanın direnci aşağıdaki formül ile bulunur.

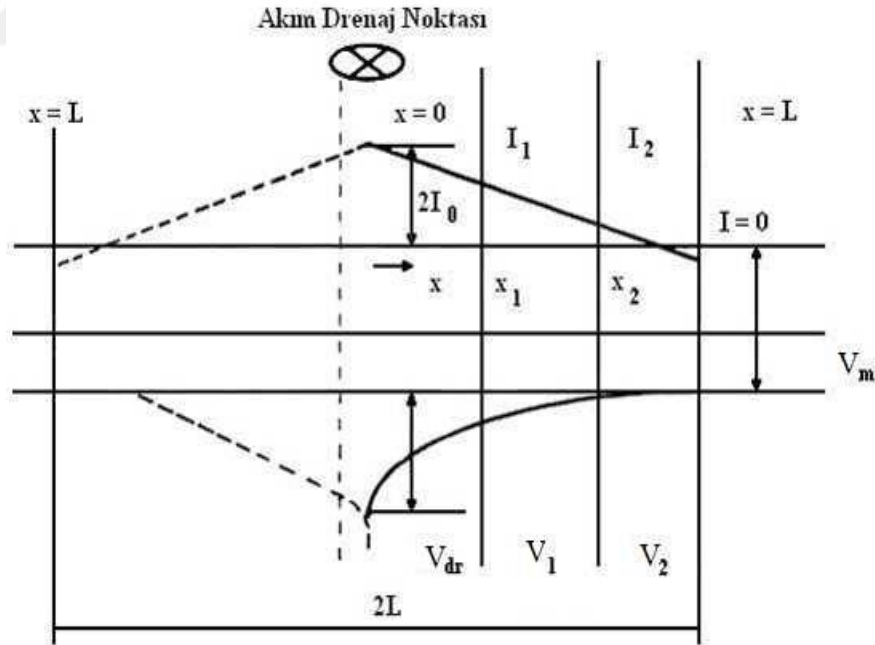
$$R_{KC1} = \frac{R_{KC}}{\pi \times D} \quad (3.12)$$

- $R_{KC}$ : Kaplama direnci (Ohm.m<sup>2</sup>)

$$R_k = \sqrt{R_{KC1} \times r} \quad (3.13)$$

- $R_k$ : 1 metre borudaki karakteristik direnci (Ohm)

Sonlu boru hattının akım ihtiyacı: Boru hattının izole bir flanş ile sonlandırılmasıyla sonlu bir boru hattı oluşur. Katodik koruma uygulama kriterlerine göre boru hattında ölçülen değer her noktada boru/toprak potansiyeli Cu/CuSO<sub>4</sub> referans elektrotuna göre -850 mVolt değerinden daha düşük bir değer olması gerekir. Boru hattına verilen akım noktasındaki boru/toprak gerilimi en yüksek değeri alır. Verilen akımın bölgesindeki gerilim ve akımdaki değişim iki tarafa doğru hiperbolik fonksiyon şeklinde düşer (Kortek.com, 2013).



Şekil 3.6 İzole flanş ile sonlandırılmış boru hattının akım-gerilim grafiği

Yukarıdaki Şekil 3.6'da hiperbolik fonksiyon değişimine göre akım ifadelerine aşağıdaki formüller ile ulaşılır.



$$V_1 = V_2 \times \cosh [a \times (x_2 - x_1)] + R_k \times I_2 \times \sinh [a \times (x_2 - x_1)] \quad (3.14)$$

$$I_1 = I_2 \times \cosh [a \times (x_2 - x_1)] + \frac{V_1 \times \sinh [a \times (x_2 - x_1)]}{R_k} \quad (3.15)$$

- $V_1, V_2$ : 1 ve 2 noktaları arasında gerilimdeki değişme (V)
- $I_1, I_2$ : 1 ve 2 noktaları arasındaki akım değişimi (A)
- $a$ : Sönüm sabiti (1/m)
- $R_k$ : Boru hattı karakteristik direnci (Ohm )
- $x_2$ : 2 noktasının akım drenaj noktasına uzaklığı (m)
- $x_1$ : 1 noktasının akım drenaj noktasına uzaklığı (m)

Yukarıda verilen formüller izole flanş ile sonlandırılmış olan boru hatları için genel geçer formüllerdir. Akım drenaj noktası için  $x_1 = 0$  alınır ve  $x_2$  değeri de katodik koruma ile korunabilecek en fazla boru mesafesi  $L$  olarak alınır,  $x_2 - x_1 = L$  olur. Sistem tarafından korunabilecek olan en uç noktadaki gerilimi  $V_2 = 0,4$  Volt şeklinde yerine koyabiliriz. Bu kabulün başlıca nedeni ise 0,45 Volt olarak kabul edilen boru kendi potansiyelinden 0,4 Voltluk sapma göstererek boru sonunda da 0,85 Volt koruma kriterini uygulamaktır. Böylece 300 mV'luk potansiyel kayma kriterinde uygulanması sağlanır. Emniyet payı uygulanarak  $V_2 = V_m = V_s = 0,45$  Volt olarak yerine konulabilir. Bu uç noktadaki akım değeri ise ( $I_2$ ) yok sayılacak kadar küçük değerler alır. Bunların ardından gerilim değişimi formülündeki ikinci terim yok sayılarak,  $V_1$  de  $V_{DR}$  ile ifade edilir ve akım drenaj noktasındaki gerilimde yaşanan değişiklik aşağıdaki formül ile hesaplanabilir (3.16).

$$V_{DR} = V_s \times \cosh(a \times L) \quad (3.16)$$

Belirlenmiş bir  $L$  aralığındaki boru parçasının katodik olarak korunabilmesi için ihtiyaç duyulan akım aşağıdaki formülde verilmiştir (3.17).

$$I_K = (V_s / R_k) \times \sinh(a \times L) \quad (3.17)$$

Boru hattında katodik koruma ile korunabilecek olan en fazla boru mesafesi ( $L_{max}$ ) ise  $V_{DR} = 1,2$  Volt,  $V_s = 0,4$  V alınarak eşitlik (3.18)'deki formülde gerekli değerler yerine yazılarak bulunur.

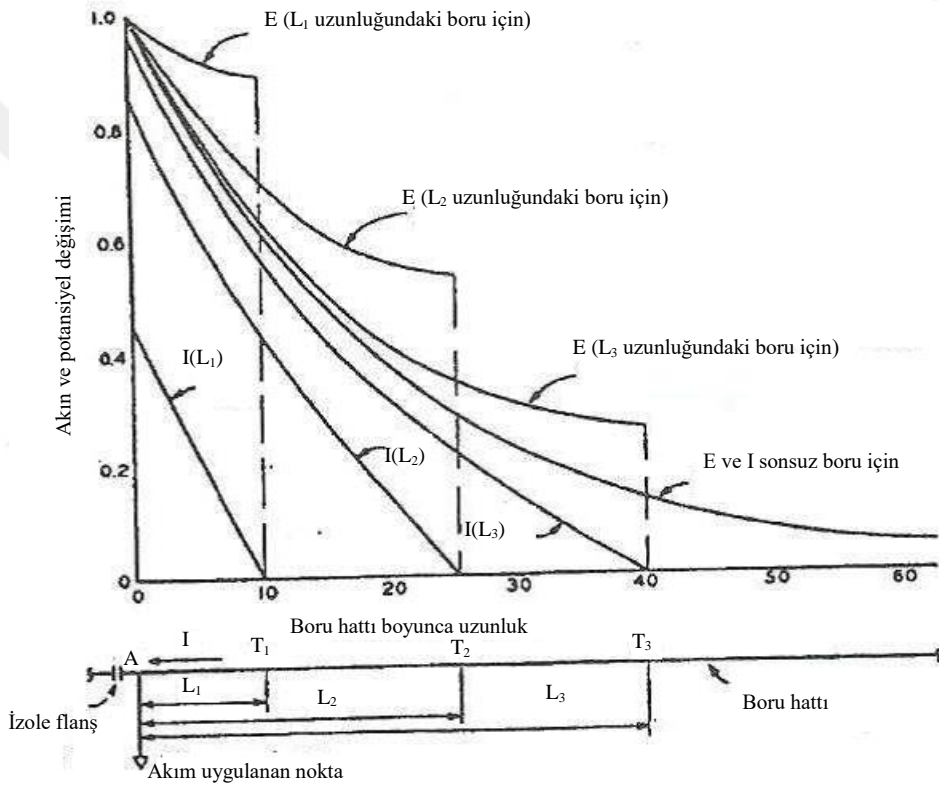
$$L_{max} = \frac{\cosh^{-1}(V_{DR}/V_s)}{a} \quad (3.18)$$

Boru hattına uygulanan akım noktasından herhangi bir mesafeye  $x$  dersek ve bu  $x$  mesafesindeki akım ve gerilim ifadeleri aşağıda verilen formüller ile hesaplanır.

$$I_X = I_D \times \frac{\sinh[a \times (L-x)]}{\sinh(a \times L)} \quad (3.19)$$

$$V_x = V_D \times \frac{\cosh[a \times (L-x)]}{\cosh(a \times L)} \quad (3.20)$$

Sonsuz boru hattının akım ihtiyacı: Boru hattı eğer bir izole flanşla ya da herhangi bir sonlandırıcı tesisat elemanı ile sınırlandırılmamış ise akımın verildiği noktadan yani drenaj noktasından itibaren gerilim ve akımındaki değişimi mesafeye göre logaritmik formüller ile ifade edilir. Sonlandırılmamış olan boru hattının logaritmik eğrisi aşağıdaki Şekil 3.7’de belirtilmiştir.



**Şekil 3.7** İzole flanş ile sonlandırılmış ve sonlandırılmamış olan boru hattının akım ve gerilim değişim logaritmik eğrisi

$$V_S = V_{DR} \times e^{(-a \times L)} \quad (3.21)$$

$$I_S = I_{DR} \times e^{(-a \times L)} \quad (3.22)$$

- $V_{DR}$ : Akım drenaj noktasında boru/zemin gerilimi değişimi (Volt)
- $I_{DR}$ : Akım drenaj noktasında akımının değişimi (Amper)
- $V_S$ : Akım drenaj noktasından L uzaklıktaki boru/zemin gerilimi değişimi (Volt)
- $I_S$ : Akım uygulanan noktadan L uzaklıkta akımın değişimi (Amper)

- a: Sönüm sabiti ( $m^{-1}$ )
- L: Akım drenaj noktasına olan uzaklık (m)

Aşağıdaki kabuller sonucunda formül (3.21) ve (3.22) elde edilir (Yalçın ve Koç, 1999).

Zemin özgül direnci ve boru kaplaması boru hattı boyunca üniform bir yapıya sahiptir.

Anot yatağı korunacak boru hattından minimum 70 metre uzaklığa kurulu olduğu.

Mevcut boru hattının çapının ve et kalınlığının değişmediği aynı zamanda boru hattı boyunca herhangi bir elektriksel direnci etkileyecek bir bağlantı olmadığı kabul edilir.

Korunan boru hattının herhangi bir bağlantı ile sonlandırılmadığı kabul edilir. Uygulanan akım kaybolana kadar akımın boru hattı boyunca akabildiği kabullenilir.

L mesafedeki boru hattının korunması için akım ihtiyacı ( $I_K$ ) ise aşağıdaki formül ile verilmiştir (3.23).

$$I_K = \frac{V_S}{R_K} e^{(a \times L)} \quad (3.23)$$

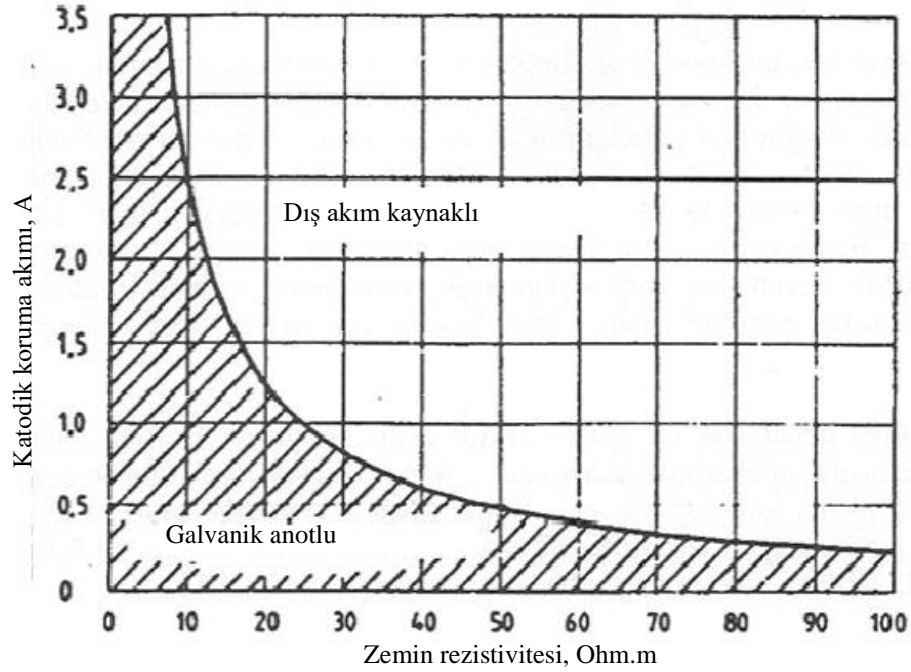
Sistemin koruyabileceği en fazla boru uzunluğu ise  $V_{DR} = 1,2$  Volt,  $V_S = 0,4$  V olduğu kabul edilerek aşağıdaki formül ile bulunabilir (3.24).

$$L_{max} = \frac{\ln(V_{DR}) - \ln(V_S)}{a} \quad (3.24)$$

### 3.1.6. Katodik koruma sistemi tercihi

Yüksek basınçlı doğalgaz hatlarının korozyona karşı dayanımının artırılması gerekir. Bunun başlıca yolu ise katodik koruma uygulamalarını gerçekleştirmektir. Katodik koruma gerçekleştirilmeyen ya da katodik koruma uygulamasının yanlış yapılması durumunda boru hattında aşınmalar sonucu delikler açılabilir ya da ani boru açılmaları gerçekleşebilir bu durumda büyük bir sızıntı oluşur can kayıplarına yol açabilir. Aynı zamanda ülkemiz için önemli enerji kaynaklarının başında gelen doğalgaz kaybı nedeniyle de enerji kayıpları oluşur. Bütün olumsuzlukları önlemek için, boru hattına sadece katodik koruma uygulamanın yanı sıra, doğalgaz proje tasarım aşamasında katodik koruma akım ihtiyaçlarının doğru bir şekilde hesaplanması, gerekli fizibilite çalışmaları yapıldıktan sonra boru hattını koruyabilecek olan katodik koruma

türünü doğru bir şekilde belirlemek ve uygulamak gerekir. Tesis bakım onarım hizmetlerinin de düzenli olarak verilmesi önem arz eder. Yani bu aşamada katodik koruma sistemlerinde dış akım kaynaklı veya galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinden hangisinin seçileceğine karar verilir.



Şekil 3.8 Katodik koruma türü tercih grafiği

Koruma türü seçimi koruma akım ihtiyacı ve toprak zemin rezistivite değerleri göz önüne alınarak yapılır. Katodik koruma türünün seçiminde incelenecek olan temel grafik yukarıdaki Şekil 3.8’de verilmiştir (Yalçın ve Koç, 1999).

### 3.1.7. Anot yatağı dizaynı

Katodik koruma sistemlerinde kullanılacak olan anotların anot yatağının tasarımı için katodik korumanın ihtiyaç duyduğu akımın belli olması gerekir.

Hesaplanan katodik koruma akım ihtiyacı değerleri, katodik korumanın ilk olarak yapıldığında sisteme gerekli olan ve boru hattı yüzeyinin polarize olmadan önceki akım ihtiyacını ifade eder. Korunan boru hattı polarizasyona uğradıktan sonra ihtiyaç duyduğu akım gittikçe azalır ve bu duruma karşılık boru kaplamasının direnci de azalış gösterir. Bu durumdan dolayı da zamanla akım ihtiyacında artışlar meydana gelmeye başlar. Bu gelişmeler dolayısıyla katodik korumanın yapıldığı süre boyunca geçerli olacak olan ortalama akım ihtiyaç değeri belirlenir (Yalçın ve Koç, 1999).

Katodik koruma proje aşamasındayken hesaplanan akım ihtiyaç değerinin %15 fazlası alınarak anot yatağı hesabı yapılır (kortek.com, 2013). Sistem koruması için gerekecek olan anot sayısı ise tasarım aşamasında belirlenen akım değerine göre hesaplanır.

$$I_K = i \times A \text{ (mA)} \quad (3.25)$$

- $I_K$ : Katodik koruma için toplam akım ihtiyacı (mA)
- $i$ : Akımın yoğunluğu (mA/ m<sup>2</sup>) (Tahmini seçim veya Kalman eğrisinden)
- $A$ : Korunacak boru hattı yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$$I = V / R_T \quad (3.26)$$

$$N = I_K / I \quad (3.27)$$

- $I$ : Tek bir anottan alınan akım (mA)
- $V$ : Anodun boru hattı çeliğine göre sahip olduğu potansiyel (mV)
- $N$ : Anot adeti

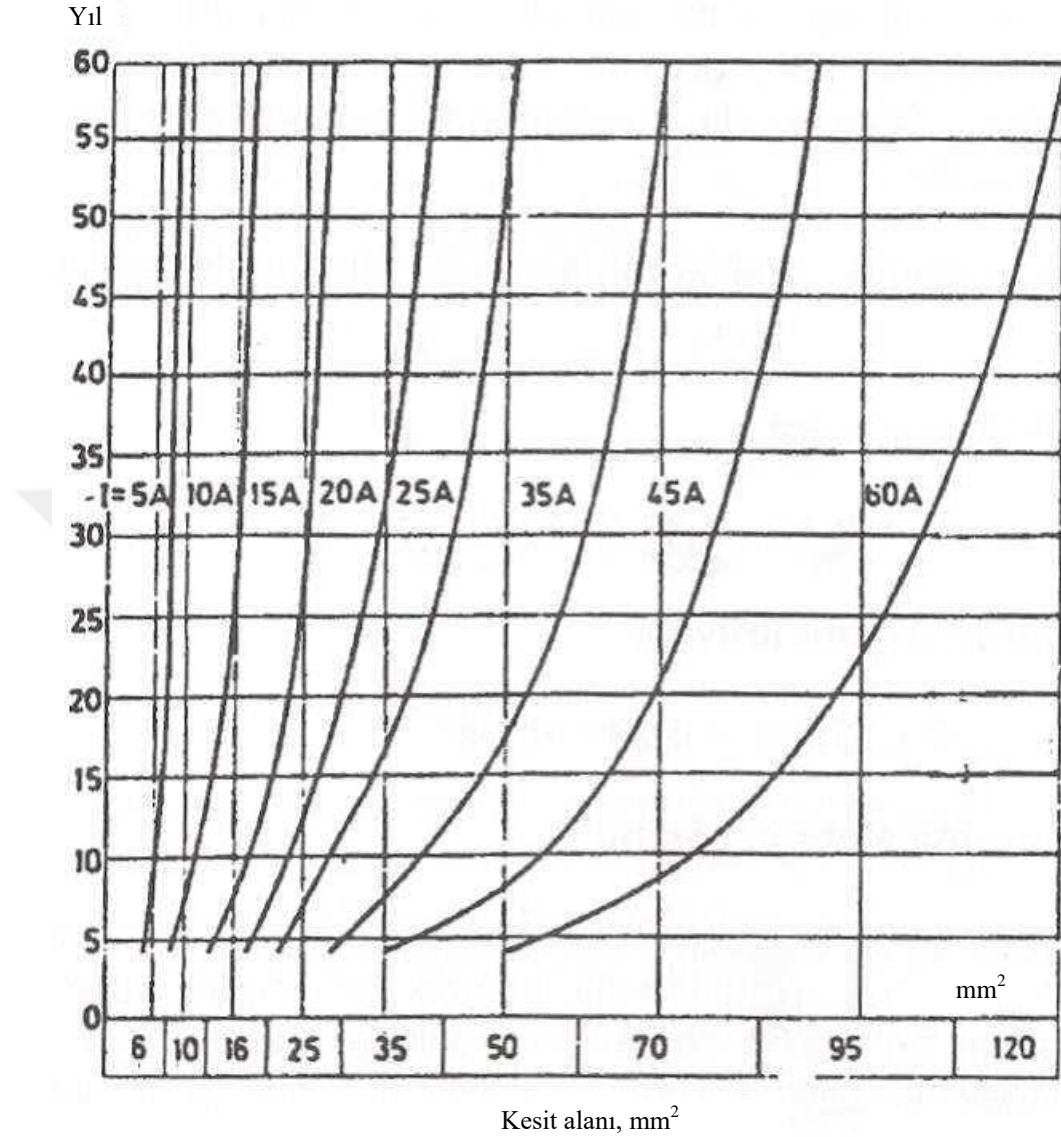
Kullanılacak anot adetleri hesaplandıktan sonra katodik koruma sistem ömrüne anot yatağı toplam direnci hesaplanır ve anot yatağı tasarımı yapılabilir. Dış akım kaynaklı katodik koruma ve galvanik anotlu katodik korum sistemlerinde anot yatağının toplam direnci belirlenirken benzer formüller kullanılır. Önceki bölümlerde galvanik anotlu katodik koruma ve dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin anot yatağı toplam direnç hesapları, anot ömür hesapları ve anotların montaj şekli anlatılmıştır.

### **3.1.8. Dış akım kaynaklı katodik koruma için t/r ünitesi akım ve gerilim değer tespiti**

Katodik koruma sistemlerinde transformatör/redresör ünitesinin gerilim ve akım değerleri yalnızca dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri için belirlenir. Bir önceki başlık altında katodik koruma için hesaplanan akım değerinin %15'i alınarak anot yatağı akım ihtiyacı bulunmuştu, T/R ünitesi için ise katodik koruma akım değerinin % 40 fazlası alınarak akım ihtiyacı hesaplanır. Dış akım kaynaklı katodik koruma devresindeki toplam dirençler bulunur ve akım ile çarpılır ise gerilim değerine ulaşılır.

T/R ünitesinin sahip olduğu iç direnci yok denecek kadar azdır bu yüzden hesaplama esnasında ihmal edilir. Kablo dirençlerinin bulunabilmesi için de kablonun

kesiti toplam kablo uzunluğunun bilinmesi gerekir. Kesit alanına göre ekonomik olan kablo seçimi için aşağıdaki Şekil 3.9'dan faydalanılır (Yalçın ve Koç, 1999).



Şekil 3.9 Uygun kablo tercihi için verilen grafik

### 3.2. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Dış Akım Kayaklı Katodik Koruma Testleri

#### 3.2.1. Kullanılan boru hattı karakteristik özellikleri

Deneysel çalışmalar kapsamında dış akım sistemli katodik koruma sistemini daha iyi anlayabilmek adına çapı 10" boyu 13 km uzunluğunda polietilen kaplı olan örnek boru hattı katodik koruma uygulaması incelenecektir. Bu hattın başlangıcından itibaren üzerinde ise 7880 metrede bir karayolu geçidi, 8700 metrede yüksek gelirim

hattı, 650 ve 8950 metrelerde ise iki adet dere geçişi özel geçişleri bulunduğu kabul edilmektedir.

Şekil 3.10'da dış akım kaynaklı katodik koruma uygulaması yapılması planlanan boru hattı görüntüsü mevcuttur.



Şekil 3.10 Dış akım kaynaklı katodik koruma uygulaması yapılması planlanan boru hattı

### 3.2.2. Deneysel olarak çalışılan Boru hattının zemin özgül direnç hesap yöntemi

Her kilometre başına 1,6 metre ve 3,2 metre derinlikte wenner 4 elektrot yöntemi kullanılarak rezistivite değerleri toprak meğeri olarak adlandırılan elektriksel devre direnci ölçen ölçü aleti ile ölçülür. Dış akım kaynaklı katodik koruma projelerinde zemin yapısında fazla değişkenlik göstermediği güzergâhlarda kilometre başına ölçüm yapılır.



Şekil 3.11 Toprak meğeri



Şekil 3.11'deki ölçüm aletinden alınan değerler aşağıdaki bağıntı yardımı ile (3.28) yerine konularak rezistivite değerini elde edildi.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \quad (3.28)$$

$\rho$ : Rezistivite (Ohm.cm)

a: Elektrotlar arası mesafe

R: Rezistivite aleti üzerinden ölçülen değer

- Toprak rezistivite aleti en az 1 yılda kalibre edilmelidir.
- Ortalama toprak rezistivitesi aritmetik ve logaritmik ortalama alınarak hesaplanır.

Aritmetik Ortalama:

$$\rho_{\text{ort}} = \frac{\sum \rho - \frac{(\rho_{\text{max}} + \rho_{\text{min}})}{2}}{N-1} \quad (3.29)$$

$\rho_{\text{ort}}$ : Ortalama toprak rezistivitesi

$\sum \rho$ : Toprak rezistivitesi toplamları

$\rho_{\text{max}}$ : En yüksek rezistivite değeri

$\rho_{\text{min}}$ : En düşük rezistivite değeri

N: Alınan rezistivite sayısı

### 3.2.3. Toprak pH değeri ölçüm yöntemi

Her 1 kilometre başına alınan toprak zemin numuneleri pH metre denilen alet ile ölçülerek pH değerleri bulunur (Şekil 3.12).

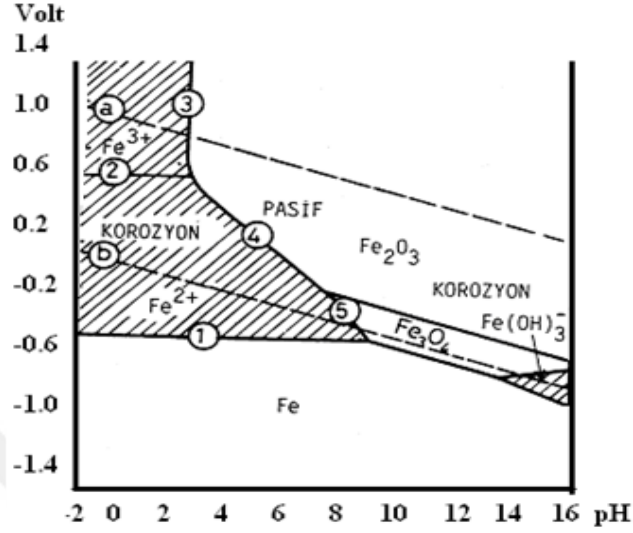


Şekil 3.12 pH metre

Zeminden alınan numunelerin %20 oranında nemlendirilmesi sonucunda pH metre cihazı ile ölçüm yapılır ve ölçüm değeri kaydedilir. Ölçülen değerler ışığında zemin yapısının asidik ya da bazik olduğu belirlenir. Boru hattının geçmiş olduğu bu



güzergâhın sahip olduğu ortalama karakteristik özelliği bu yöntemle de belirlenir. Demirin potansiyel pH diyagramı yardımı ile boru hattının bulunduğu bölge koşulları göz önüne alınarak katodik koruma dizaynı daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilir. Potansiyel pH diyagramı (Pourbaix diyagramı) aşağıda verilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Pourbaix diyagramı

Şekil 3.13'te görülmekte olan taralı kısımlar da demir elementinin korozyon olayına maruz kaldığı, boş görülen bölgeler de ise korozyon olayının gerçekleşmediği bölgelerdir. Doğal potansiyelde (500 mV) pH değeri 10 ile 13 arasında korozyonun gerçekleşmediği kabul edilir.

#### 3.2.4. Boru hattı redoks potansiyel ölçüm yöntemi

Redoks potansiyel değerleri zemin üzerinden her bir kilometre başına ölçülür. Redoks potansiyelini ölçmek için gerekli alet Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Dijital redoks ölçüm cihazı

Boru hattının geçtiği güzergâh üzerinde pH ve zemin redoks potansiyeli ölçümü için alınan toprak numunelerinin redoks potansiyelleri ölçülür. Zemin redoks potansiyel değerlerinin ölçülmesi ile boru hattının geçtiği zemin içerisinde anaerobik korozyon tehlikesinin olup olmadığının anlaşılması sağlanır. Anaerobik korozyon önceki bölümlerde bahsi geçtiği üzere, balçık ve bataklık gibi bazı anaerobik zeminlerde yaşayan bakteri türlerinin yol açtığı korozyon türüdür. Bu bakterilerin en ciddi hasar vereni sülfatları sülfüre çeviren bakteri türleridir. Anerobik zeminlerde, sülfat içeren bileşiklerdeki oksijeni kullanarak sülfürlü bileşikler şekline dönüştürürler. Bu demek oluyor ki (+6) değerliğe sahip kükürdü (-2) değerliğe sahip kükürt haline indirgerler. Ayrıca boru yüzeyinde sülfat atomlarının olmaması durumunda, katodik reaksiyonun gerçekleşmesi sonucunda hidrojen atomları harcanarak boru temas yüzeyinde depolarizasyona uğramasına sebep olur. Gerçekleşen reaksiyonlar neticesinde korozyon olayının hızlı bir şekilde ilerlemesi ve katodik olarak koruması gerçekleştirilen boru hattındaki ihtiyaç duyulan akımın yükselmesine etken olur.

Toprak zeminin sahip olduğu redoks potansiyeli, toprağa daldırılan platin bir elektrotun, referans elektroda göre oluşan potansiyel farkı ölçülerek aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$E_{red} = E_p + E_{ref} + 60 (pH-7) \quad (3.30)$$

Burada:

$E_{red}$ : Zemin redoks potansiyel değeri (mV)

$E_p$ : Platin elektrotunun zemin içinde sahip olduğu potansiyel (mV)

E: Kullanılan referans elektrotun standart hidrojen elektrotuna göre potansiyeli (mV) (Doygun bakır/bakır sülfat için 316 mV)

### 3.2.5. Boru hattı kaplama direnci ve akım ihtiyacı hesap yöntemi

Botaş teknik şartnamesine uyularak toprak rezistivitesi kaplama direnci arasındaki bağlantı Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Bu tablo dikkate alınarak boru hattının ihtiyaç duyduğu akım ve T/R ünitesinin kapasitesi belirlenir.

Boru hattı katodik koruma sistemi çalıştırıldığı zaman katodik koruma istasyonları arası mesafe ve koruma açısından herhangi bir problem ile karşılaşılması durumunda ilave dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi kurulur.

T/R ünitesinin koruma mesafesi hesaplamasında aritmetik rezistivite ortalamasına göre kaplama direnci alınarak hesaplamalar yapılır.

Katodik koruma sistem elemanlarının kurulacağı yerlerin ve sistemin büyüklüğünün saptanabilmesinde, boru hattı uzunluğunca sistemin ihtiyaç duyduğu en yüksek akım ve boru/toprak potansiyelinin sınırları içerisinde kalmak için gereken en az istasyon sayısı dikkate alınmaktadır.

Boru hattının korozyondan korunması için gereken potansiyel artışı ve akım önceden belirtilmiş olan sonlu boru hattı Şekil 3.6'da ki grafiğin eğrilerinin yorumlanması ile (3.14) ve (3.15) deki bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu bağlantılar yardımı ile boru hattı karakteristik direnci (3.13), boru hattının uzunlaşmasına direnci (3.11), 1 metre borudaki kaplama direnci (3.12) ve sönümlenme sabiti (3.10) bağlantıları çıkarılarak bu bağlantılar yardımı ile bir sonraki başlık altında dış akım kaynaklı katodik koruma devresinde ihtiyaç duyulan T/R ünitesi âdeti ve akım ihtiyaçları hesaplanacak olup katodik koruma için yetecek sistem hazırlanacaktır.

Boru / toprak potansiyeli, Cu/CuSO<sub>4</sub> (bakır / bakır sülfat) elektrotu referans elektrot olarak alınarak -450 mVolt varsayılan doğal potansiyel eklenerek hesaplanacak olan potansiyel yükselmesine eş değer hale gelecektir.

### 3.2.6. Ölçü kutuları ve özellikleri

Tüm ölçü kutuları standartlarda uygun olarak borulu tip olarak tercih edilmelidir. Ölçü kutuları TSE'ne uygun bir biçimde sıcak galvanizlenmiş olarak kullanılmalıdır. Şekil 3.15'te örnek bir ölçüm kutusu ve iç kısmı gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Örnek proje kapsamında kullanılması planlanan ölçü kutusu ve kutunun iç kısmı

Örnek proje kapsamında boru hattı üzerinde kurulması planlanan ölçü kutuları:

Tek test noktası (STP): Diğer ölçü kutuları ile denk gelmeyecek bir biçimde kilometre başına konumlandırılacaktır. Ayrıca önceden yerleri belirlenmiş olan bazı yol veya dere geçişlerinde de konumlandırılacaktır. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde boru hattından bir tek kablo ölçü kutusuna getirilir. Kullanılan kablo 1x10 mm<sup>2</sup> NYY'dir.

Ampermetrik test noktası (ATP): Altı kilometrede bir konumlandırılmaktadır. Boru hattının 100 metre sol tarafında ve 100 metre sağ tarafında 1x25 mm<sup>2</sup> NYY kablo çekilir ve kablolar farklı renkte olur.

Yüksek gerilim drenaj ölçü kutusu (HVAC): Yüksek gerilim hatları ile boru hattının kesişmesi ya da paralel denk geldiği noktalarda konumlandırılır.

Bu tür ölçü kutusu boru hattını kesen veya paralel giden yüksek gerilim enerji nakil hatlarının (YGENH) boru hattı üzerinde oluşturduğu AC enterferansı voltajını azaltmak için boru hattı üzerine konumlandırılır.

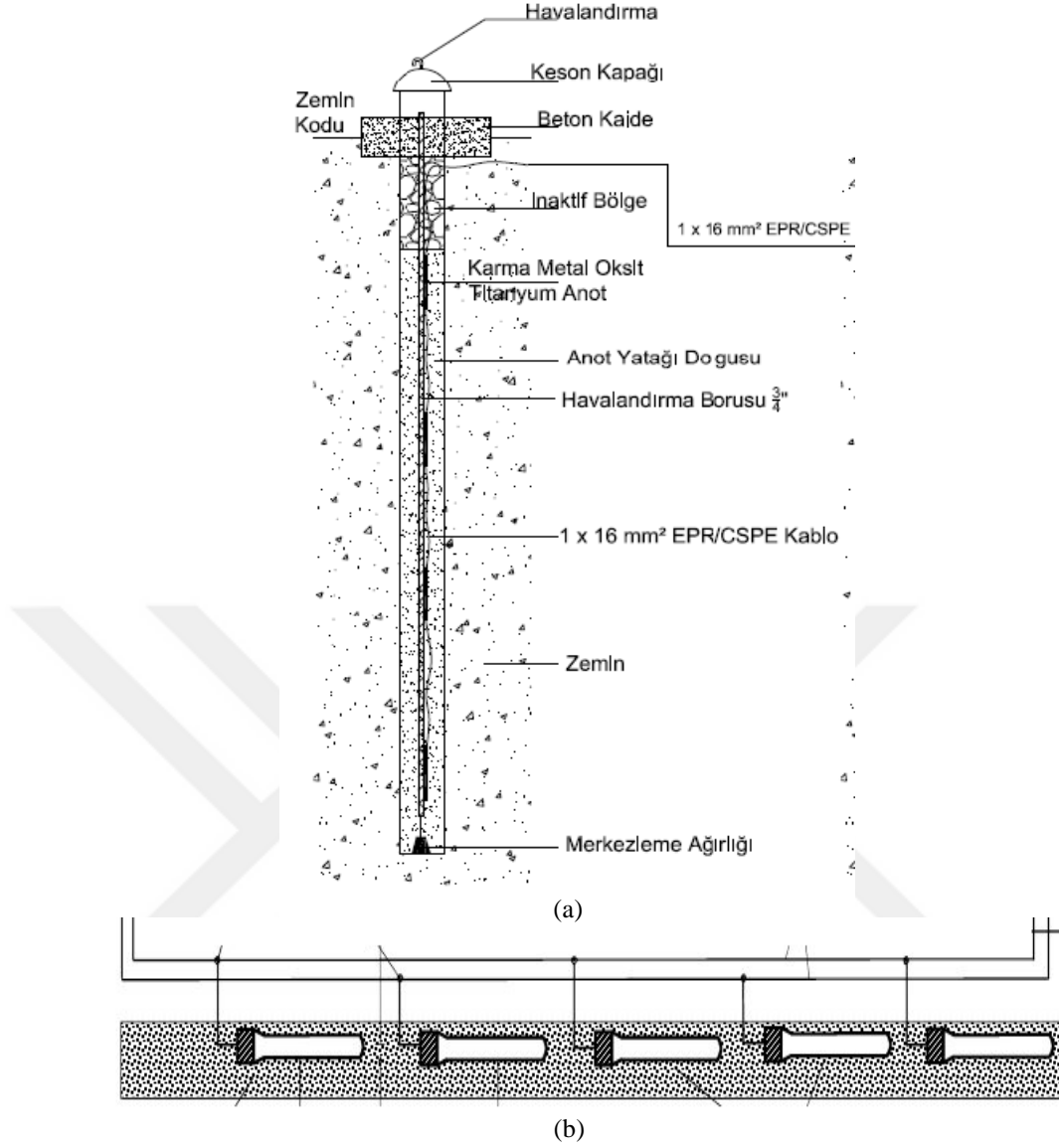
İzole mafsal ölçü kutusu (SIJ): Her bir izole mafsal noktasına konumlandırılır.

İzole mafsal veya izole flanş konulan noktalarda korunan boru hattı tarafından ve korunmayan boru hattı tarafından ikişer adet 1x25 mm<sup>2</sup> NYY kablo alınır ve ölçü kutusuna bağlanır.

Anot yatağı test noktası (GBTP): Anot yataklarının başında ve sonunda konumlandırılır.

### **3.2.7. Boru hattı anot yatağı**

Katodik koruma uygulanacak olan boru hattı sistemine yapılan hesaplamaları yapılarak kaç adet T/R ünitesi ve anot yatağı konumlandırılacağı belirlenir. Anot yatağı kablo bağlantıları GBTP tip ve sistem kontrolü ölçü kutusu ile gerçekleştirilir. Anot yatağının 100 metre yakınına T/R ünitesi konumlandırılması acil durumlarda müdahale için gereklidir. Şekil 3.16'da sistemde kullanılabilecek anot yataklarının yerleşim planı verilmektedir.



Şekil 3.16 Anot yatakları (a) derin kuyu anot yatağı (b) sığ anot yatağı

Anot yatağına yerleştirilecek anot sayısı yapılan hesaplamalar sonucu belirlenecektir. Örnek proje kapsamında anot yatağında bulunan anotlardan en iyi verimi elde edebilmek için zeminin karakteristik özelliklerine bağlı olarak derin kuyu anot yatağı ya da sığ anot yatağı kullanımı kararlaştırılacaktır.

### 3.2.7.1. Titanyum anot

Karma metal oksit ile kaplı titanyum anotlar, titanyum elementinin iletken özelliğe sahip karma metal oksitler ile kaplanarak üretilirler. Bu tip anotlarda pasifleşme özelliği görülmemektedir. Bu anotlar, anodik tepkime sonucu klor ve oksijen iyonlarının oluşmasından etkilenmez ve pH değeri 1'e kadar asitlere dayanmaktadır.

Toprak zemin anot yatağı içerisinde kok tozu kullanılarak 20 yıllık bir kullanım ömrü için  $100 \text{ A/m}^2$  akım çekilmektedir.



Şekil 3.17 Tüp titanyum anot

Aşağıda verilmiş olan değerler anot yatağının kurulabilmesi için kullanılan hesapları göstermektedir.

Bu örnek proje kapsamında koruma sistemde karma metal oksit kaplı titanyum tüp anotlar kullanılması planlanmış olup Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Burada kullanılması planlanan anodun boyu 500 mm, çapı ise 16 mm’dir. Bu anotlar oldukça fazla akım yoğunluğuna sahip uzun ömürlü anotlardır. Tablo 3.13’te ise Karma metal oksit titanyum anot akım kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 3.13 Karma metal oksit titanyum anot akım kapasiteleri

Anot tipleri	Akım yoğunluğu	Sıcaklık	Ömür (Yıl)
Deniz tipi	$600 \text{ A/m}^2$	$50 - 70^\circ \text{ C}$	25 – 30
Toprak tipi (kok tozu içindeki)	$100 \text{ A/m}^2$	$50 - 70^\circ \text{ C}$	25 – 30
Tatlı su tipi	$100 \text{ A/m}^2$	$50 - 70^\circ \text{ C}$	25 – 30
Kirli su	$100 - 300 \text{ A/m}^2$	$50 - 70^\circ \text{ C}$	25 – 30
Çamurlu su tipi	$50 - 100 \text{ A/m}^2$	$50 - 70^\circ \text{ C}$	25 – 30

### 3.2.7.2. Kok tozu özellikleri

Dış Akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde anot yatağı dolgusu metalurjik kok tozudur (Şekil 3.18). Metalurjik kok tozu titanyum anot ile zemin arasındaki akım iletimini en iyi biçimde sağlamak amacı ile kullanılır. Metalurjik kok tozunun öz direncinin alçak seviyede olması (50–100 Ohm.cm) sebebiyle anot yatağı direncinin düşürülmesinde ve enerji tasarrufu sağlanması amacıyla uygun bir dolgu maddesidir. Kok tozunun metalurjik olarak seçilmesinin en başlıca sebebi içerdiği kül ve yabancı madde miktarının minimum seviyede olmasıdır. Bu kok tozunun belli boyutlarda olması gerekmektedir. Akımı hem iyi iletebilmeli hem de anotta oluşan oksijen gazının dışarıya atılmasına yardımcı olmalıdır. Çok sık olursa gaz çıkışının oluşu engellenmiş olur, anot yatağının direncinin yükselmesine ve bundan dolayı da T/R ünitesinde voltajın yükselmesine enerjinin boşa kullanılmasına sebep verir. Bazı durumlarda da anot yatağından akım alınamaması sebebiyle katodik koruma değerlerinin azalmasına sebep verebilir. Sistemde kullanılan kok tozu yapılacak katodik korumanın ömrü ile doğru orantılı veya daha fazla ömre sahip olması gerekmektedir. Kullanılan kok tozunun ömrü anot yatağından alınan akım ile doğru orantılı olmaktadır. Akım kapasitesi 0.25-1.00 Kg/A.yıl olarak literatür de yer almaktadır.



Şekil 3.18 Örnek proje kapsamında kullanılacak kok tozu

Katodik koruma sisteminde kullanılacak olan tüm kablolar teknik bir detay verilmediği sürece NYY tipi ve TSE standardında kullanılmaktadır. Anot yatağında 1x35 mm<sup>2</sup> NYY kablo kullanılması uygun olacaktır.



### 3.3. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Galvanik Anotlu Katodik Koruma Proje Testleri

#### 3.3.1. Deneysel çalışmadaki karakteristik özellikler

Boru hattı güzergâhının bulunduğu toprağın rezistivitesine bağlı olarak, korunacak olan sisteme yakın elektrik hattı bulunmaması ya da enterferans etkinin yoğun şekilde bulunduğu güzergâhlarda dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi kullanılmaz aynı zamanda bu mesafe için kurulum maliyeti yüksektir.

Deneysel çalışmanın yapıldığı boru hattı Pe kaplı ve birleştirme işlemleri ise elektrik ark kaynağı ile gerçekleştirilmesi muhtemeldir.

Katodik olarak korunacak olan boru hattı uzunluğu 1000 metre ve 6” çapında olacak şekilde hesaplamalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19).

Boru hattı karakteristik özelliklerinden dolayı deneysel çalışmanın yapıldığı boru hattında galvanik anotlu katodik koruma sistemi prosedürleri uygulanır.



Şekil 3.19 Örnek proje kapsamında kullanılacak 6” borular

Deneysel olarak çalışılan örnek galvanik anotlu koruma sistemi projesi TS 9234 ve TS 5141 standartlarına uygun olarak hesaplanacaktır.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemini uygulayabilmek için, borunun uzunluğu, borunun çapı, borunun kaplama türü, borunun et kalınlığı, katodik koruma sisteminin ömrünün bilinmesi gerekmektedir. Boru toprak potansiyeli anottan en uzak noktada  $Cu/CuSO_4$  referans elektrotuna göre minimum  $-850$  mV veya bu değerden daha negatif olmalıdır. Toprağın karakteristik özelliklerine göre  $AZ_3$  ve H.pot magnezyum anotların ölçüm değerleri kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilecektir.



### 3.3.2. Örnek proje boru hattı kaplaması ve akım ihtiyacı hesap yöntemi

Boru hattının kaplama cinsine bağlı olarak katodik koruma ömrü ve toprak rezistivitesine göre ihtiyaç duyulan akım belli olur (Tablo 3.14).

**Tablo 3.14** Kaplamanın cinsine bağlı olarak boru hasar yüzdeleri(k)

Kaplama Tipi	Katodik Koruma Ömrüne göre Hasara uğrama yüzdesi ( k )		
	10 yıl	20 Yıl	30 Yıl
Asfalt / Kömür katranı emaye	0,09	0,01	0,04
Füzyon bağlanmış epoksi	0,12	0,02	0,06
Sıvı Epoksi	0,03	0,1	0,3
3 kat Epoksi - Polietilen	0,009	0,001	0,004
3 kat epoksi - Polipropilen	0,009	0,001	0,004

**Tablo 3.15** Toprak rezistivitesine göre çıplak demir akım yoğunluğu

Toprak Rezistivitesi (Ohm.m)	Çıplak Demir Akım Yoğunluğu ( A / m <sup>2</sup> ) ( 30 <sup>0</sup> C de ) ( J <sub>Fe</sub> )
< 10	0,02
10 – 100	0,01
100 – 1000	0,005
> 1000	0,001

Toprak rezistivitesine göre çıplak demir akım yoğunluğu Tablo 3.15'te verilmiştir. Hava sıcaklığının her 10<sup>0</sup> C yükselmesine karşı akım yoğunluğu % 25 oranında arttırılmalıdır.

### 3.3.3. Örnek projede kullanılacak anotlar ve kabloları

Ortalama toprak rezistivitesi 30 Ohm.m'den düşük bir değer ise AZ 63 tipi magnezyum anot, bu değerden daha yüksek ise h.pot tipi magnezyum anotlar sistem içerisinde koruma için kullanılacaktır.

Tablo 3.16'da AZ 63 tip anotların kimyasal özellikleri ve Tablo 3.17'de H.pot tip anotların kimyasal özellikleri belirtilmektedir.

**Tablo 3.16** AZ 63 tip anotların kimyasal özellikleri

Element	Bileşimdeki yüzdesi
Al	% 5,3 – 6,7
Zn	% 2,5 – 3,5
Mn	% 0,25 - 0,40
Si	% 0,3 max.
Cu	% 0,08 max.
Fe	% 0,03 max.
Ni	% 0,03 max.
Anot potansiyeli: 1500-1600 mV (Cu/CuSO <sub>4</sub> )ref. Gerçek akım kapasitesi: 1.230 A.h/Kg.	

**Tablo 3.17** H.pot tip anotların kimyasal özellikleri

Element	Bileşimdeki yüzdesi
Al	% 0,05 max.
Zn	% 0,03 max.
Mn	% 0,5 - 1,5
Si	% 0,05 max.
Cu	% 0,02 max.
Fe	% 0,03 max.
Ni	% 0,02 max.

Anot potansiyeli: 1600-1700 mV (Cu/CuSO<sub>4</sub>)ref.  
Gerçek akım kapasitesi: 1.230 A.h/Kg.

**Tablo 3.18** Magnezyum anotların dolguları (ortalama toprak rezistivitesine göre)

Rezistivite değeri	Bileşim
$\rho < 20$ Ohm.m	% 25 Jips ( CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O ) , % 75 Bentonit
$20 < \rho < 100$ Ohm.m	% 50 Jips (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O), % 40 Bentonit , % 10 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
$\rho > 100$ Ohm.m	% 25 Jips, % 50 Bentonit(CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O), % 25 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Tablo 3.18’de Mg anotların hesaplanan toprak rezistivite değerlerine göre içindeki dolgu malzemelerinin oranları verilmiştir. Şekil 3.20’de örnek proje kapsamında kullanılacak olan h.pot magnezyum anodu gösterilmektedir.



**Şekil 3.20** H.pot Mg anot ve kabloları

Anot kabloları TSE’ne uygun olarak minimum 1x6 mm<sup>2</sup> NYY tip kablo olup, 3 metre uzunluğunda kullanılması uygun olacaktır.

Kablo anot bağlantı direncinin  $\leq 0,02$  Ohm.m’yi geçmemesi gerekmektedir.

Kablo ile anot arasındaki noktası bağlantı polietilen esaslı sertleşebilen, anot metali ve kabloyu sarabilir özellikte bir dolgu malzemesi ile kabloda açıkta herhangi bir yer kalmayacak şekilde doldurulacaktır.

Anotlar korunacak olan boru hattından en az 1- 1,5 metre mesafede ve 1 – 1,5 m derinliğinde montajlanmalıdır. Anotların kendi hacminin minimum 3 katına kadar su ile sulanması gerekmektedir. Sulama işlemine başlamadan önce suyun anot torbası içine etkili bir biçimde girmesi için anot bez torbası kesici bir aletle dolgu maddesi dağılmayacak şekilde açılması gerekmektedir.

Katodik koruma projelerinde kullanılacak olan tüm kablolar teknik bir detay belirtilmediği sürece 1x 6 mm<sup>2</sup> NYY kablo ve TSE'ye uygun olarak uygulanmalıdır. Boru hattı ile kablo arasındaki bağlantı cadweld kaynağı ile gerçekleştirilmelidir.

#### **3.3.4. Kullanılan malzeme ve yöntem**

Başlık 3.2'de kullanılan malzeme ve yöntemler kullanılarak ölçümler gerçekleştirilir.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde ölçü kutuları boru hattı üzerine yol kenarlarına her bir kilometrede kullanılabilir. Fakat minimum 3 adet olmak üzere istenildiği sayıda kurulmasında herhangi bir sıkıntı yoktur.

Ölçü kutuları TSE 5141 standardına uygun ve daldırma galvanizli olmalıdır. Galvaniz kalınlığı 70µ'dan küçük bir ölçüde olmayacak ya da iller bankası teknik şartnamesine uygun olacaktır.

Anot ve boru kabloları fiber plaka üzerinde sarı cıvata, somun ve lama ile şönlenecek olup, kablo pabuç bağlantıları ise lehimle bağlantısı yapılacaktır.

## 4. BULGULAR

### 4.1. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Dış Akım Kayaklı Katodik Koruma Test Sonuçları

#### 4.1.1. Rezistivite değeri

Boru hattı farklı zemin yapısı özelliklerine sahip olan bölgelerden geçmektedir. Kilometre başına yapılan ölçümler Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tabloda logaritmik hesaplamaların verilmesinin sebebi ise boru hattının üzerinden geçtiği zeminin farklı toprak özelliklerine sahip olduğu durumlarda rezistivite ölçümü sırasında bazı bölgelerde pik yapan ölçüm değerlerinin aritmetik olarak hesaplanması durumunda hesaplanacak olan ortalama rezistivite değerini yükseltmektedir. Bu pik değer alan bölgelerin ortalamaya etkisini azaltmak için ve boru hattını daha düzgün bir şekilde karakterize edebilmek amacı ile logaritmik ortalama değerleri hesaplama esnasında kullanılabilir. Bu işlem her bölgede ölçülen rezistivite değerinin logaritmasının alınarak aritmetik ortalaması yapılması ve sonucunda ters logaritma ile gerçek değere ulaşılması sağlanır.

Tablo 4.2’de boru hattı örnek güzergâhının ortalama rezistivite değerlerine göre koroziflik durumu verilmiştir.

**Tablo 4.1** Rezistivite listesi ve ortalama değer

Mesafe (km)	Elektrot Arası Mesafe (m)	Rezistivite (Ohm.cm)	Log ( r )
0+000	3,000	59650	4,775610
1+000	3,000	43504	4,638529
2+000	3,000	540	2,732394
3+000	3,000	950	2,977724
4+000	3,000	165	2,217484
5+000	3,000	142	2,152288
6+000	3,000	1425	3,153815
7+000	3,000	1685	3,226600
8+000	3,000	1765	3,246745
9+000	3,000	1876	3,273233
10+000	3,000	1956	3,291369
11+000	3,000	1564	3,194237
12+000	3,000	765	2,883661
13+000	3,000	350	2,544068
Toplam =		116337	44,31

**Tablo 4.2** Boru hattı güzergâhının ortalama rezistivite değerlerine göre koroziflik durumu

Mesafe (m)	Ortalama (Ohm.cm)	Rezistivite Aralığı	Koroziflik durumu
13000	6649	4000<P<10000	Orta korozif

Aritmetik ortalama;

$$\sum_{\rho} = 116337$$

$$\rho_{\max} = 59.650$$

$$\rho_{\min} = 142$$

$$N = 14$$

$$r_{\text{ort}} = 6649 \text{ Ohm.cm}$$

Logaritmik ortalama;

$$\sum_{\rho} = 44,31$$

$$N = 14$$

$$\text{Log}(r_{\text{ort}}) = 3,1648398$$

$$r_{\text{ort}} = 1.461,6 \text{ Ohm.cm}$$

#### 4.1.2. Ph değerleri

Deneysel çalışmalar kapsamında projede pH metre ile yapılan pH ölçümleri sonucunda zeminin ortalama pH değeri 7.26 çıkmaktadır (Tablo 4.3). Bu durumda zemin baziktir.

**Tablo 4.3** Güzergah üzerinde ki pH ölçümleri ve ortalama değer

Mesafe (km)	pH
0+000	11,5
1+000	12,5
2+000	6,8
3+000	6,8
4+000	6,6
5+000	6,4
6+000	5,9
7+000	7
8+000	6,8
9+000	6
10+000	7
11+000	6,9
12+000	6,6
13+000	6,8

Aritmetik ortalama

$$\Sigma \text{pH} = 103,5$$

$$\rho \text{H}_{\text{maks}} = 12,5$$

$$\rho \text{H}_{\text{min}} = 5,9$$

$$N = 14$$

$$\rho \text{H}_{\text{ort}} = 7,26$$

#### 4.1.3. Redoks ölçüm sonuçları

Örnek proje kapsamında zemin üzerinden kilometre başına alınan ölçümlere göre zemin redoks potansiyeline göre koroziflik derecesi orta korozif olarak çıkmaktadır (Tablo 4.4).

**Tablo 4.4** Güzergâh üzerinden redoks ölçümleri ve ortalama değer

Mesafe (km)	Zemin Redoks Potansiyeli (mV)
0+000	2945
1+000	1800
2+000	110
3+000	140
4+000	103
5+000	110
6+000	180
7+000	185
8+000	165
9+000	160
10+000	190
11+000	145
12+000	140
13+000	120
$\Sigma \text{RDX} = 6493$ $\text{RDX}_{\text{max}} = 2945$ $\text{RDX}_{\text{min}} = 103$ $N = 14$ $\text{RDX}_{\text{ort}} = 382$	

#### 4.1.4. Boru hattı kaplama direnci ve t/r ünitesi akım ihtiyacı

Ortalama rezistivite değeri 6649 Ohm.cm değerinde hesaplanmış olup tabloya bakıldığı zaman bunun karşılık değeri Tablo 4.5'te gösterilmektedir. Kplama direnci 6000 Ohm.m<sup>2</sup> alınarak hesap yapılacaktır.

**Tablo 4.5** Rezistivite ortalamasına göre kaplama direnç değeri

6649 Ohm.cm için kaplama direnç değeri 6000 Ohm.m<sup>2</sup> ( Bkz. Tablo 3.6 )

- Korunacak olan boru hattı toplam uzunluğu (L) 13000 metredir.
- Ortalama boru hattının çapı (D=10") 0,254 metredir.
- Çelik borunun et kalınlığı (t) 0,006 metredir.
- Ortalama toprak rezistivitesi 6649 Ohm.cm'dir.
- Boru hattı özgül direnci ( $\rho_{B0}$ ) 0,00000018 Ohm.m'dir. (Çelik malzeme için sabit.)
- 1 metre borunun uzunlamasına direnci (R);

$$R = \frac{\rho_B}{\pi \times (D-t) \times t} \quad (4.1)$$

$$R = \frac{0,00000018}{\pi \times (0,254 - 0,006) \times 0,006} = 0,0000385 \text{ Ohm/m}$$

- Boru/zemin kaplama direnci hesaplanırken boru korumasız kabul edilir. ( $R_{KC}$ ); 6000 Ohm.m<sup>2</sup>
- 1 metre boruya uygulanan kaplama direnci ( $R_{KC1}$ );

$$R_{KC1} = \frac{R_{KC}}{\pi \times D} \quad (4.2)$$

$$R_{KC1} = \frac{6000}{\pi \times 0,254} = 7522,94 \text{ Ohm.m}$$

- Sönümleme sabiti;

$$a = \sqrt{\frac{R}{R_{KC1}}} \quad (4.3)$$

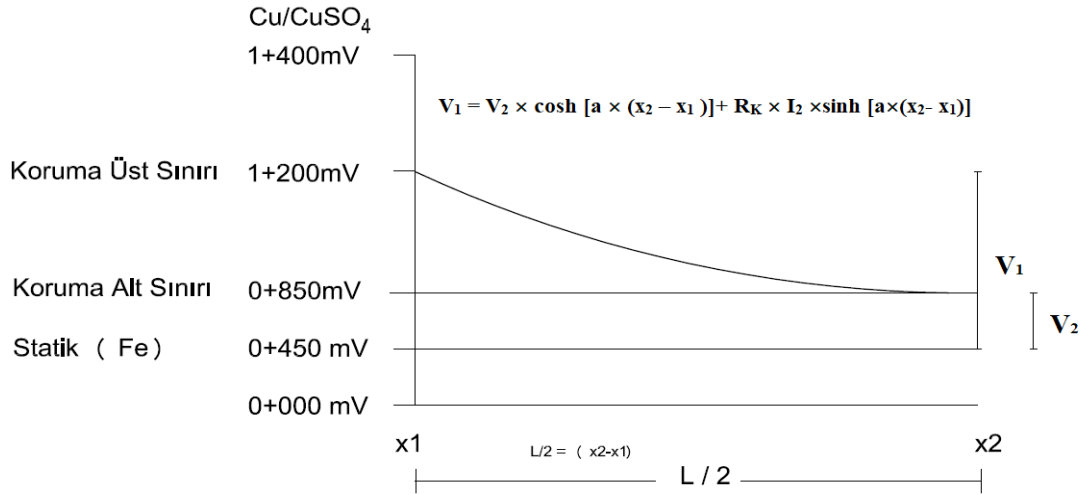
$$a = \sqrt{\frac{0,0000385}{7522,9}} = 0,0000720 \text{ m}^{-1}$$

- Boru hattı karakteristik direnci ( $R_k$ );

$$R_k = \sqrt{R_{KC1} \times r} \quad (4.4)$$

$$R_k = \sqrt{0,0000385 \times 7522,94} = 0,5382 \text{ Ohm}$$

- Boru hattının korumasız potansiyeli (Cu/CuSO<sub>4</sub> ref. elk.) ( $V_s$ ) 0,45 Volt değerindedir.
- Son noktadaki potansiyel yükselme miktarı ( $V_2$ ) 0,4 Volt değerindedir.
- Son noktadaki potansiyel yükselme miktarı (Cu/CuSO<sub>4</sub> ref. elk.) 0,85 Volt değerindedir.
- İlk noktadaki potansiyel yükselme miktarı ( $V_1$ ) 0,75 volt değerindedir.
- İlk noktadaki potansiyel yükselme miktarı (Cu/CuSO<sub>4</sub> ref. elk.) 1,2 voltur.



Şekil 4.1 T/R ünitesi koruma mesafesi

Şekil 4.1'de ki grafikten yararlanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılır.

- T/R ünitesi koruma mesafesi  $2 \times L/2 = L$

$$L = (2 \times \text{Arcoth}(V_1/V_2))/a \quad (4.5)$$

$$L = \frac{2 \times \text{Arcoth}(0,75/0,4)}{0,0000720} = 34488 \text{ m}$$

- T/R ünitesi Akım Çıkışı (I):

$$I = (2 \times V_2 \times \text{Sinh}((a \times L)/2))/R_k \quad (4.6)$$

$$I = \frac{2 \times 0,4 \times \text{Sinh}(0,000072 \times 17244)}{0,54} = 2,36 \text{ Amp}$$



- Toplam Koruma Alanı (A)

$$A = \pi \times D \times L \quad (4.7)$$

$$A = 3,14 \times 0,254 \times 34488 = 27506,2 \text{ m}^2$$

- Boru Hattı Akım Yoğunluğu (I<sub>s</sub>)

$$I_s = (I \times 1000) / A \quad (4.8)$$

$$I_s = \frac{2,36 \times 1000}{27506,2} = 0.086 \text{ mA/m}^2$$

Koruma için gereken T/R ünitesi sayısı iki kriter göz önüne alınarak belirlenir;

Koruma mesafesi: Yapılan hesaplamalar sonucu T/R ünitesi koruma mesafesi 34488 metre çıkmaktadır. Örnek hat uzunluğu 13000 metre olduğu için sisteme 1 adet T/R ünitesi kurulması uygundur.

Akım İhtiyacı: Boru hattının ihtiyaç duyduğu akımın %25 fazlası (2.36x1,25=2.95 A) alınarak herhangi bir probleme imkân vermeden hesaplamalar yapılır. Standart bir T/R Ünitesi 50V/20A kapasitelidir. 20 Amper kapasitesine sahip 1 adet T/R Ünitesi boru hattının korunması için yeterli olacaktır.

Her iki kriter de göz önüne alındığında 1 adet 50V/20A kapasiteli bir T/R ünitesi kullanılması uygundur.

#### 4.1.5. Anot yatağı hesabı ve t/r ünitesi kapasitesi

Dış akım kaynaklı katodik koruma projelerinde dış akıma yardımcı anotların bulunduğu yatakların cinsini belirlerken yardımcı anotların T/R ünitesine verdiği akımın verimini arttırıcı yönde olması gerekmektedir. İki çeşit anot yatağı kurulumunu gerçekleştirmek mümkün olacaktır fakat burada hattın geçeceği güzergâhın toprak resistivite değeri önem taşır. Sığ anot yatakları resistivitenin 1000 Ohm.m'ye kadar olduğu zeminlerde kullanılabilir ve geniş bir alana ihtiyaç duyar. Derin kuyu anot yatakları ise yüksek resistivite değerlerinde kullanılabilir ve dar bir alana kurulur. Yapılan toprak resistivite hesaplamaları için alınan örnek zemin numunelerinde ortalama toprak resistivitesi 6649 Ohm.cm'dir. Toprak direnci çok yüksek olduğu için ve alan tasarrufu sağladığından dolayı örnek koruma projesi kapsamında derin kuyu anot yatağı kullanılması uygundur.

Derin kuyu anot yatağına daldırılan anotlardan en yüksek verimi elde edebilmek için derin kuyunun en fazla 55 metre olması uygundur. Derinlik arttıkça zeminin direnci artacağı gibi anotları taşıyan kabloların üzerinde yük artarak anotların direncini düşürecektir.

Anot yatağının gerekli akımı T/R ünitesine daha hızlı ve verimli verebilmesi için T/R ünitesi ile yakın konumlandırılması gerekmektedir. İkisi arasındaki mesafenin 100 metreye kadar yakın olması sağlanır. Örnek proje kapsamında T/R ünitesi ve anot yatağı boru hattı başlangıcına konumlandırılması boru hattına akımın daha iyi aktarılması ve arıza durumunda müdahale edilmesini sağlayacaktır. T/R ünitesi ve anot yatağının birbirine yakın olması anotlar üzerinde bir enterferans etkisi yaratacağından dolayı zeminden itibaren 5 metre derinliğe kadar olan bölge inaktif bölge olarak adlandırılır ve bu bölümde anotlar etkisini gösteremeyeceği için anot yerleşimi 5 metreden sonra gerçekleştirilir. Geriye kalan 50 metre ise aktif bölge olarak adlandırılır ve anotlar arası mesafe 2 metre olacak şekilde yerleştirilir. Anot yatağında bulunan kok tozu içerisinde paralel bağlı bir devre oluşturarak direnci artan 500 x  $\phi$ 16 tüp karma metal oksit kaplı titanyum anotların kullanılması tercih sebebidir.

Kok tozu içine yatırılan karma metal oksit anotların akım kapasitesi 100 A/m<sup>2</sup>'dir. Bu bilgi ışığında bir adet anottan sistem tarafından kullanılacak akım anodun yüzey alanı ile doğru orantılı olmaktadır. Bu durumda gerekli hesaplamalar yapıldığı zaman (3,14 x 0,50 x 0,016) anot yüzey alanı 0,02512 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmaktadır.

1 m<sup>2</sup> titanyum 100 Amper çekmektedir, 1,6/50 tüp anot akımı ise 100x0,02512=2,512 Amper'dir.

Boru hattı ihtiyaç duyduğu akım ise 2,36 amper olarak hesaplanmıştır.

Bir anot yatağı için gerekli anot sayısı ise 2,95/2,512= $\sim$ 2 adet olarak hesaplanmaktadır.

Fakat bu hesaplardan farklı olarak anot sayıları anot yatağı direncinin hesaplamalar sonucu 2 ohm değerinden büyük çıkması ile yükselir.

Anot yatağı dirençleri anot yatağının ölçüsüne, anot yatağının boyuna, kok tozu direncine, anotlar arası bağlantıda kullanılan kablonun kesiti, boyuna ve yatağın bulunduğu zeminin rezistivite değerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Boru hattı başlangıcına konumlandırılması planlanan anot yatağının toprak rezistivite değerleri proje hesaplama aşamasında zemin rezistivite değerleri 55 metre derinliğe

inilemeyeceğinden dolayı bu değere eşdeğer sonuç verecek şekilde elektrot arası mesafe ayarlanarak ortalama rezistivite değeri anot yatağı için ayrıca hesaplanır (Tablo 4.6).

**Tablo 4.6** Anot yatağı noktası ortalama direnç değeri

No	Elektrot arası mesafe (m)	Rezistivite (Ohm.cm)
1	3	59650
2	10	15326
3	20	12266
4	30	10162
5	40	8366
6	50	3180
7	55	2055
Toplam		111005

Aritmetik ortalama

$$\Sigma\rho = 111.005$$

$$\rho_{\text{mak}} = 59.650$$

$$\rho_{\text{min}} = 2.055$$

$$N = 7$$

$$r_{\text{ort}} = 13500 \text{ Ohm.cm}$$

Anot âdeti hesaplamalarında 2 adet titanyum anot boru akım ihtiyacını karşılamaktadır. Fakat bu kadar anot başlangıç noktası rezistivite değeri olan 59650 Ohm.cm'yi aşamayacak, şartnamelerde istenen 2 ohm anot yatağı direncinden fazla bir direnç ortaya çıkacaktır. Bu yüzden en iyi verime ulaşabilmek için belirtilen derinlik olan 55 metreye göre anot sayısı arttırılarak anot yatağı direncinin 2 ohm' un altına düşürülmesi sağlanacaktır. 55 metrede inaktif (anotsuz) bölgelerde göz önüne alınarak 2 şer metre aralıklarla toplamda 20 adet anot kullanılması uygundur.

- Anot yatağı tipi: Derin kuyu anot yatağı
- Anot tipi: Karma metal oksit kaplı titanyum tüp anot (Standart: 1,6/50)
- Akım kapasitesi: 100 A/m<sup>2</sup> (Kok tozu içerisinde)
- En fazla akım çıkışı: 2,512 A (1 adet anot için)
- İstenen minimum ömür: 25 yıl
- Anot sayısı (N): 20 adet
- Anotlar arası uzaklık: 200 cm

- İnaktif bölge uzunluğu ( $L_{in}$ ): 500 cm
- Aktif bölge uzunluğu ( $L_w$ ): 5000 cm
- Derin kuyunun çapı ( $D_a$ ): 22 cm
- Anot yatağı zemin rezistivitesi ( $\rho_a$ ): 13.500 Ohm.cm
- Dolgu malzemesi rezistivitesi ( $\rho_d$ ) 50 Ohm.cm
- Anot boyu ( $L_a$ ): 50 cm
- Anot çapı ( $d_a$ ): 1,6 cm
- Titanyum anot / dolgu geçiş direnci R(Ti-D):

$$\frac{\rho}{2 \times \pi \times L_a} \times \left[ \ln \left( 8 \times \frac{L_a}{d_a} \right) - 1 \right] \quad (4.9)$$

$$\frac{50}{2 \times 3,14 \times 50} \times \left[ \ln \left( 8 \times \frac{50}{1,6} \right) - 1 \right] = 0,72 \text{ Ohm}$$

- Dolgu / toprak geçiş direnci R(D-T):

$$\frac{\rho}{2 \times \pi \times L_w} \times \left[ \ln \left( 8 \times \frac{L_w}{D_a} \right) - 1 \right] \quad (4.10)$$

$$\frac{13500}{2 \times 3,14 \times 5000} \times \left[ \ln \left( 8 \times \frac{5000}{22} \right) - 1 \right] = 2,80 \text{ Ohm}$$

- Girişim faktörü (f):

$$1 + \frac{\rho_{(a)}}{\pi \times S_a \times R(\text{Ti-D})} \times \ln(0,66 \times N) \quad (4.11)$$

$$1 + \frac{50}{3,14 \times 200 \times 0,72} \times \ln(0,66 \times 20) = 1,285$$

- 20 adet (N) anodun direnci:

$$R(\text{Ti-top}) = R(\text{Ti-D}) \times \frac{f}{N} \quad (4.12)$$

$$0,72 \times \frac{1,285}{20} = 0,05 \text{ Ohm}$$

- Anot yatağı direnci ( $R_t$ ):

$$R_t = R(\text{Ti-top}) + R(\text{D-T}) \quad (4.13)$$

$$2,8 + 0,05 = 2,85 \text{ Ohm}$$

Hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan anot yatağı direnci 2 ohm değerinden yüksek olup istenen şartlar 2 adet yerine 20 adet anot kullanıldığı zaman da bile sağlanamamıştır. Bu durumda tek bir anot yatağı yetmeyecektir. İkinci bir anot yatağı

ile direncin 2 ohm'un altına indirilmesi gerekmektedir. Aynı direnç değerine sahip ikinci bir anot yatağı ile direnç değerini düşürülmeye çalışılacaktır. Burada bağıntı (4.14) kullanılmaktadır.

- Toplam sistem devre direnci ( $R_s$ ):

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{t1}} + \frac{1}{R_{t2}} \quad (4.14)$$

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{2,85} + \frac{1}{2,85} \quad R_s = 1,425 \text{ ohm}$$

İkinci anot yatağı hesabı ile anot yatağı akım direnci 2 ohm'un altına indirilerek istenilen şartlar sağlanmıştır. Örnek proje kapsamında 2 adet anot yatağı kurulumu uygun olacaktır. Anot yataklarının birbirine yakın kurulması uygundur.

- Bir anot yatağından en fazla anot yatağı akım çıkışı 20 adet anot için ( $2,512 \times 20$ ) 50,24 amper olarak hesaplanır.
- Koruma sisteminde anot yatağında kullanılacak olan kok tozu miktarı ( $Q_{KOK}$ ) (2 adet anot yatağı için):

$$Q_{KOK} = V(m^3) \times \rho_{(kok)} \times 2 \quad (4.15)$$

$$(0,11^2 \times 3,14 \times 55)(m^3) \times 0,83(\text{ton}/m^3) \times 2 = 3.47 \text{ ton}$$

- Kok tozunun ömür hesabı:

$$\text{Ömür(kok)} = \frac{Q_{KOK}}{I_{KOK} \times I_{BORU}} \quad (4.16)$$

Boru hattının anot yatağından istediği akım ( $I_{BORU}$ ): 2,95 A

Kok tozu akım kapasitesi ( $I_{KOK}_{(max)}$ ): 1 kg/A.Yıl

Kullanılacak kok tozu ölçüsü ( $Q_{KOK}$ ): 3470 kg

Yukarıda verilen bilgileri bağıntı (4.16)' da yerine yerleştirirsek kok tozu ömrünü hesaplayabiliriz.

$$\frac{3470 \text{ (kg)}}{1 \left( \frac{\text{kg}}{\text{A.Yıl}} \right) \times 2,95 \text{ (A)}} = 1176,27 \text{ Yıl}$$

- T/R ünitesinin kapasitesi (En yüksek akım ihtiyacına göre hesap yapılır.):

$R_{ANOT \text{ YATAĞI}}$  (En yüksek): 2.85 Ohm

I (Boru hattı akım ihtiyacı): 2,95 Amper

Botaş teknik şartnamesinin kurallarına bağlı olarak T/R ünitesi kapasitesi belirlenir.

T/R ünitesi DC amper: 2,95 Amper

$$\text{DC Volt} = I \times R + 2 \quad (4.17)$$

$$2,95 \times 2,85 + 2 = 10,4075 \text{ Volt}$$

Seçilen T/R ünitesi kapasitesi 50 V / 20 A (DC)'dir (standart üretim).

#### 4.1.6. Geçici katodik koruma uygulaması

Örnek proje kapsamında boru hattına uygulanacak olan dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi devreye alınana kadar geçecek süre zarfında boru hattının korozyona uğramasını önlemek amacıyla geçici süreliğine galvanik anotlu katodik koruma uygulaması gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu geçici süre dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin problemsiz bir şekilde devreye alınmasına kadar geçen süredir. Koruma kurulumu aşamasında çıkabilecek problemlere karşı kurulumun da geç tamamlanması ihtimali durumları göz önüne alınarak ortalama 1,5 yıl boru hattının koruması galvanik anotlu katodik koruma sistemini ile tamamlanması sağlanır.

- Korunacak olan çelik borusu alanı:

$$A = \pi \times D \times L = 10368,3 \text{ m}^2 \quad (4.18)$$

- İstenen katodik koruma ömrü: 1,5 Yıl
- Kaplama türü: PE kaplama
- Akım yoğunluğu (Js): Tablo 3.14'ten 0,001 ve tablo 3.15'ten 0,001 A/m<sup>2</sup> bulunur. Bulunan değerler çarpılarak 0,01 mA/m<sup>2</sup> bulunur. Hesaplama işleminde bulunan bu değer kullanılabilir fakat dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin kurulumu sırasında geçen sürenin 1,5 yılı geçmesi durumu göz önüne alınarak bulunan akım değerinin 10 katı alınarak hesaplamalar gerçekleştirilir. Buradan akım değeri 0,1 mA/m<sup>2</sup> çıkmaktadır.
- Toplam gerekli akım:

$$I_k = A \times J_s \quad (4.19)$$

$$0,1 \text{ mA/m}^2 \times 10368,3 \text{ m}^2 = 1037 \text{ mA}$$

- Sistemde kullanılacak olan anot türü h.pot magnezyum anot olup 5 lb (2,3kg) olarak seçimi yapılmıştır.
- Anodun çıplak haldeki uzunluğu (L<sub>a</sub>) 35cm'dir.
- Anodun çıplak haldeki çapı (D<sub>a</sub>) 8 cm'dir.
- Anodun standart boyu (L<sub>d</sub>) 43 cm'dir.

- Anodun dolgulu çapı ( $D_d$ ) 15 cm'dir.
- Toprağın ortalama rezistivitesi ( $r$ ) 6649 Ohm.cm'dir.
- Dolgu rezistivitesi ( $r$ ) 100 Ohm.cm'dir.
- H.pot magnezyum anot / dolgu geçiş direnci  $R(A-D)$

$$\frac{\rho}{2 \times \pi \times L_a} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{L_a}{D_a} \right) - 1 \right] \quad (4.20)$$

Bağıntı (4.20) yardımı ile aşağıdaki sonuç elde edilmiş olur.

$$\frac{100}{2 \times 3,14 \times 35} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{35}{8} \right) - 1 \right] = 0,85 \text{ Ohm}$$

- Dolgu geçiş direnci/ toprak geçiş direnci  $R(D-T)$

$$\frac{\rho}{2 \times \pi \times L_d} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{L_d}{D_d} \right) - 1 \right] \quad (4.21)$$

Bağıntı (4.21) yardımıyla aşağıdaki sonuç elde edilmiş olur.

$$\frac{6649}{2 \times 3,14 \times 43} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{43}{15} \right) - 1 \right] = 35,44 \text{ Ohm}$$

- Toplam anot direnci ise formül (4.22) yardımı ile 36,29 Ohm olarak hesaplanır.

$$R_t = R(A-D) + R(D-T) \quad (4.22)$$

$$R_t = 0,85 + 35,44 = 36,29$$

- Seçilen anot tipi h.pot magnezyum anot olup anodun  $Cu/CuSO_4$  referans elektrotuna göre potansiyeli 1700 mili volt, koruma potansiyeli gene  $Cu/CuSO_4$  referans elektrotuna göre 850 mili voltur.
- Anot çalışma potansiyeli ( $V_a = 1700 \text{ mV} - 850 \text{ mV}$ ) 0,85 volt olarak hesaplanmaktadır.
- Anot akımı ( $I_a$ ):

$$I_a = V_a / R_t \quad (4.23)$$

$$0,85 / 36,29 = 23,4 \text{ mA}$$

- Teorik akım kapasitesi 2200 A.h/Kg,
- Anot verimi 0,5
- Kullanma faktörü 0,85
- Gerçek akım kapasitesi 1230 A.h/Kg
- Anot ömrü hesabı:

$$\text{Anot Ömrü} = \frac{\text{anot kütlesi(kg)} \times \text{gerçek akım kapasitesi}}{\text{Anot akım çıkışı(A)} \times 8760} \quad (4.24)$$

$$\frac{2,3(\text{kg}) \times 1230 (\text{A.h/Kg})}{0,0234 (\text{A}) \times 8760} = 13,8 \text{ yıl}$$

- Galvanik anotlu katodik koruma için gerekli olan anot adedi hesabı:

$$\text{Anot adedi(N)} = \frac{I_s}{I_a} \quad (4.25)$$

$$\frac{1037 \text{ mA}}{23,4 \text{ mA}} = 45 \text{ adet}$$

45 adet anot 13,8 yıl hattı koruyacaktır. İstenilen ömür ise 1,5 yıl olup 5 adet anot bu sürede hattı korumaya yeterli olacaktır. Bu anotlar 13 kilometrelik hatta eşit dağılımlar ile ölçü kutusu ile birlikte boru hattına bağlanacaktır. Galvanik anotla yapılan katodik koruma işlemlerinde ayrıca bir anot yatağına gerek olmadığı için ayrıca bir anot yatağı dizaynı gerekmeyecektir.

#### 4.1.7. Örnek proje kapsamında elde edilen bulguların özeti

Örnek proje kapsamında örnek boru hattının güzergahı üzerinden alınan numunelerin toprak rezistivite ölçümleri sonucunda, boru hattı boyunca toprağın ortalama rezistivite değeri 6649 Ohm.cm olarak hesaplanmış olup toprağın orta korozif özellikler taşıdığı belirlenmiştir. Alınan örnekler üzerinden redox potansiyeli ve pH ölçümleri de yapılmış olup ölçülen değerler kendi başlıkları altında verilmiştir. İhtiyaç duyulan akım ve koruma mesafesi belirlenirken toprak rezistivitesine göre kaplama direnç tablosundan yararlanılmıştır.

13000 metrelik örnek projede hattın koruma sistemi olarak dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin seçilmesinin nedeni boru hattı akım ihtiyacının yüksek ve zeminin korozif özelliklere sahip olmasıdır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 1 adet T/R ünitesi kullanılması yeterli olacaktır. Anot yatağı 2 adet kurulacaktır. Derin kuyu olarak planlanacaktır.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi düzgün bir biçimde devreye alınana kadar, hat için uygun değerlerde galvanik anotlu geçici katodik koruma sistemi uygulanacaktır.



Örnek proje kapsamında koruma sisteminde T/R ünitesi manuel-otomatik model seçilmesi uygundur. Yardımcı anotlar ise karma metal oksit kaplı titanyum tüp anot ( $\phi 16-500\text{mm}$ ) tipinde seçilecektir.

Boru hattının başında ve sonunda standart olarak SIJ ölçü kutuları ile spark gap elemanı kullanılacaktır.

7880 metrede yol geçişi ile 650 ve 8950 metrelerde dere geçişlerinin iki tarafında STP ölçü kutuları konumlandırılması uygundur.

8700 metredeki yüksek gerilim hattı için HVAC ölçü kutuları ile topraklama kazıkları kullanılacak, boru üzerindeki enterferans etkisi solid state polarizasyon hücresi ile toprağa boşaltılacaktır.

Botaş teknik şartnamesi nedeniyle de 6 kilometrede bir ATP ölçü kutuları konumlandırılması gerekmektedir.

Hat üzerindeki kablolar botaş şartnamesine uygun olarak EPR/CSPE ve NYY tipinde kullanılır. Kablo ile boru bağlantısı termik kaynak elemanı ile sağlanacak ve buna uygun bir malzeme ile izolesi sağlanacaktır.

## 4.2. Deneysel Çalışmalar Kapsamında Galvanik Anotlu Katodik Koruma Test Sonuçları

### 4.2.1. Toprak rezistivite ölçüm sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında boru hattı güzergahı zemini üzerinden kilometre başına alınan toprak numunelerin rezistivite değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

**Tablo 4.7** Zemin rezistivite değerleri

Mesafe (km)	Elektrot Arası Mesafe (m)	Rezistivite (Ohm.cm)
0+000	3,000	6845
1+000	3,000	5155
TOPLAM		12000

$$\rho_{\text{ort}} = 6000 \text{ Ohm.cm}$$

Yapılan hesaplama sonucu ortalama rezistivite değeri 6000 Ohm.cm olarak bulunmuştur. Tablo 4.18’de ortalama rezistivite değerine göre korozyon durumu verilmiştir.

**Tablo 4.8** Ortalama rezistivite değerine göre korozyon durumu

Mesafe (m)	Ortalama (Ohm.cm)	Rezistivite Aralığı	Korozyon durumu
1000	6000	$4000 < P < 10000$	Orta korozyon

#### 4.2.2. Ph ölçüm sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında boru hattı güzergahı zemini üzerinden kilometre başına alınan toprak numunelerin pH değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

**Tablo 4.9** pH ölçümleri ve ortalama değer

Mesafe (km)	pH
0+000	7.5
1+000	7.3

$$pH_{ort}=7.4$$

Yapılan ölçümler sonucunda zeminin bazik özellikte olduğu ortaya çıkmıştır.

#### 4.2.3. Redoks ölçüm sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında güzergâh üzerinden kilometrede bir alınan toprak numunelerin redoks değerleri Tablo 4.10’da verilmiştir.

**Tablo 4.10** Redoks ölçümleri ve ortalama değer

Mesafe (km)	Zemin Redoks Potansiyeli (mV)
0+000	300
1+000	460

$$RDX_{ort} = 380$$

Redoks ölçümleri sonucu zeminin orta korozif özellikte belirlenmiştir.

#### 4.2.4. Anot âdeti ve ömür hesaplamaları

- Korunacak olan çelik boru hattı boyu (L) 1000 metredir.
- Korunacak olan çelik boru hattı çapı (6") 0,1524 metredir.
- Korunacak olan çelik borusu alanı;

$$A=\pi \times D \times L=478,5 \text{ m}^2 \quad (4.26)$$

- Akım yoğunluğu (Js): Tablo 3.14’ten 0.001 ve tablo 3.15’ten 0,001 A/m<sup>2</sup> bulunur. Bulunan değerler çarpılarak 0,01 mA/m<sup>2</sup> bulunur. Yanılma payları ve ileride çıkabilecek problemlere karşı akım değerinin 10 katı alınarak hesaplamalar gerçekleştirilir. Buradan akım değeri 0,1 mA/m<sup>2</sup> çıkmaktadır.

- Gerekli olan akım ( $I_k$ ):

$$I_k = A \times J_s \quad (4.27)$$

$$0.1 \text{ mA/m}^2 \times 478,5 \text{ m}^2 = 48 \text{ mA}$$

- İstenilen minimum katodik koruma ömrü 20 yıldır.
- Sistemde kullanılacak olan anot türü h.pot magnezyum anot olup 17 lb (7,7 kg)'dir.
- Anodun çıplak haldeki uzunluğu ( $L_a$ ) 65 cm'dir.
- Anodun çıplak haldeki çapı ( $D_a$ ) 9 cm'dir.
- Anodun standart boyu ( $L_d$ ) 80 cm'dir.
- Anodun dolgulu çapı ( $D_d$ ) 20 cm'dir.
- Toprağın ortalama rezistivitesi ( $r$ ) 6.000 Ohm.cm'dir.
- Dolgu rezistivitesi ( $r$ ) 100 Ohm.cm'dir.
- H.pot magnezyum anot / dolgu geçiş direnci R(A-D)

$$\frac{\rho}{2 \times \pi \times L_a} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{L_a}{D_a} \right) - 1 \right] \quad (4.28)$$

Bağıntı (4.28) yardımı ile aşağıdaki sonuç elde edilmiş olur.

$$\frac{100}{2 \times 3,14 \times 65} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{65}{9} \right) - 1 \right] = 0,58 \text{ Ohm}$$

- Dolgu geçiş direnci/ toprak geçiş direnci R(D-T)

$$\frac{\rho}{2 \times \pi \times L_d} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{L_d}{D_d} \right) - 1 \right] \quad (4.29)$$

- Bağlantı (4.29) yardımıyla aşağıdaki sonuç elde edilmiş olur.

$$\frac{6000}{2 \times 3,14 \times 80} \times \left[ \ln \left( 4 \times \frac{80}{20} \right) - 1 \right] = 21,17 \text{ Ohm}$$

- Toplam anot direnci ise bağıntı (4.30) yardımı ile 21,75 Ohm olarak bulunur.

$$R_t = R(A-D) + R(D-T) \quad (4.30)$$

- Seçilen anot tipi h.pot magnezyum anot olup anodun Cu/CuSO<sub>4</sub> referans elektrotuna göre potansiyeli 1700 mili volt, koruma potansiyeli gene Cu/CuSO<sub>4</sub> referans elektrotuna göre 850 mili voltur.
- Anot çalışma potansiyeli ( $V_a = 1700 \text{ mV} - 850 \text{ mV}$ ) 0,85 volt olarak hesaplanmaktadır.

- Anot akımı ( $I_a$ ):

$$I_a = V_a / R_t \quad (4.31)$$

$$0.85 / 21.75 = 39,1 \text{ mA}$$

- Teorik akım kapasitesi 2200 A.h/Kg,
- Anot verimi 0,5
- Kullanma faktörü 0,85
- Gerçek akım kapasitesi 1230 A.h/Kg
- Bir tek anot için anot ömrü hesabı:

$$\text{Anot Ömrü} = \frac{\text{anot kütlesi(kg)} \times \text{gerçek akım kapasitesi}}{\text{Anot akım çıkışı(A)} \times 8760} \quad (4.32)$$

$$\frac{7,7(\text{kg}) \times 1230 (\text{A.h/Kg})}{0,0391 (\text{A}) \times 8760} = 27,7 \text{ yıl}$$

- Galvanik anotlu katodik koruma için gerekli olan anot adedi hesabı:

$$\text{Anot adedi(N)} = \frac{I_s}{I_a} \quad (4.33)$$

$$\frac{48 \text{ mA}}{39,1 \text{ mA}} \cong 2 \text{ adet}$$

Deneysel çalışmalar kapsamında yapılan hesaplamalar sonucu katodik koruma projesinde 2 adet 17 lb h.pot magnezyum anot kullanılması hattı korumak için yeterli olacaktır. Anotlar hattın orta noktasına yerleştirilecektir. Hattın başına ve anotların olduğu kısma birer adet toplamda 2 adet STP ölçü kutusu konumlandırılması uygun olacaktır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzün hızla ilerleyen teknoloji dünyasında insanların kaynaklara ulaşma ihtiyacındaki hız ve kalitede artmıştır. Bu kaynaklar enerji gereksinimi için petrol ve doğalgaz ile temel ihtiyaç olan içme suyu veya kullanım suyudur. İhtiyaç duyulan bu kaynakların aktarımının da sorunsuz ve hızlı bir biçimde sağlanması önem taşımaktadır. Bu kaynakların son kullanıcıya ulaşabilmesi boru hatları yardımı ile gerçekleşmektedir.

Bu kaynakların taşınımının gerçekleşebilmesi için çeşitli ortamlara konumlandırılan boru hatları bulunduğu ortamın etkisiyle zaman içerisinde aşınmalara uğrayarak patlamalara sebep verip yüksek zararlara yol açmaktadır. Bu aşınmalar boru hattının bulunduğu ortamdaki çeşitli korozif etkenlere bağlı olarak hızlı veya daha yavaş gerçekleşir. Bu aşınmalar gözle fark edildiği zaman geri dönüşü olmayan yola girilmiş olmaktadır. Meydana gelen korozyon sonucu ülkelerin ekonomik kayıplar artacak ve milli gelirleri israfa uğrayacaktır.

Boru hattının bulunduğu ortamın hat üzerinde oluşturabileceği korozif etkilerin önüne geçebilmek için çeşitli koruma teknikleri geliştirilmiş olup belli bir süre dahi olsa boru hattının korunumu sağlanmak istenmiştir. Boru hattına çeşitli kaplamalar yapılarak, boya uygulaması yapılarak, inhibitörler kullanılarak ya da en güvenilir yol olan katodik koruma uygulaması yapılarak korozyon koruması gerçekleştirilerek korozif ortamın zararlarının önüne geçilebilir.

Katodik koruma uygulaması boru hattının uzunluğu ve bulunduğu ortamın koroziflik oranına ve uygulama maliyetine bağlı olarak, galvanik anotlu ya da dış akım kaynaklı olarak yapılmaktadır. Her iki koruma türünün de her türlü ortamda uygulanabilmesinin bir maliyeti olmaktadır. Çok uzun ve aşırı bir korozif ortamda bulunan boru hattına her iki tür katodik koruma yapılabilir. Fakat galvanik anotlu katodik koruma yapıldığı zaman kullanılacak anot sayısı artacaktır. Sistemin içinde bulunduğu ortam boru hattından daha çok akım çekeceği için anotların ömürleri hemen tükenecektir. Bunların yerlerine yenilerini koymak ve takibini yapmak aşırı derece maliyetli olmaktadır. Boru hattında hattı korumak için ihtiyaç duyulan akımı dış bir akım kaynağından sağlanırsa akım akışı sürekli olarak devam edecek ve akım şiddeti istenilen düzeyde T/R ünitesi yardımı ile ayarlanabilecektir. Maliyeti galvanik anotlu koruma sistemine göre daha düşük olacaktır. Bunun tam tersi bir durumda yani korunacak boru hattı kısa olup korozif ortamın etkisi düşük olur ise koruma için gerek

duyulan akım dış bir akım kaynağından temin edilirse maliyet galvanik anotlu koruma sistemine göre daha da artacaktır. Bütün bunlar deneme yanılma yöntemiyle yapılamayacak derece önemli hususlar olup boru hattı, korozif ortam ve ihtiyaç duyulan koruma akımı değerleri hesaplanarak koruma sisteminin türü seçilerek sistem güvenli bir şekilde korumaya alınmalıdır.

Uzun bir boru hattı, çevre koşulları ve ihtiyaç duyulan akım incelendiğinde bu hat için en uygun korumanın dış akım kaynaklı katodik koruma olduğu kanısına varılmış ve sisteme uygun bir koruma hattı planı yapılmıştır. İhtiyaç duyulan akım hesaplanmış ve buna göre T/R ünitesi kurulmuştur. Diğer projemizde ise boru hattı kısa ve akım ihtiyacı düşüktür çevredeki korozif etkenlerde zayıf olunca burada dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi oldukça maliyetli olacaktır bu yüzden galvanik anotlu katodik koruma sistemi kurulmuştur.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi yüksek akıma ihtiyaç duyan hatlarda kullanılacaktır. Fakat bu sistem tercih edilmeden önce dış akım alınabileceği durumda mıdır ona bakılarak sistem tercihi yapılmalıdır. Eğer dış akım kaynağına erişim maliyetli olacak olursa galvanik anotlu koruma sistemini kullanmak bir tercih sebebi olabilir tabi bütün bunlara karar verebilmek için gerekli olan hesaplamaların detaylıca incelenip herhangi bir hataya yer verilmeyecek şekilde planlanmalıdır.

Bu tezde korozyonun olumsuz etkileri anlatılarak durumun öneminden bahsedilmektedir. Korozyon zararlarının önüne geçebilmek için uygulamada kullanılan doğru yöntemler ile korozif etkilerin nasıl engelleneceği konusunda yapılan çalışmalar ile sektöre yardımcı olabilecek çözümler üretilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- Aygün, H. (2003). Korozyon ve Jeotermal Uygulamalar. VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildirileri, İzmir: İZFAŞ, 423-444.
- Bıyık, G. (2013). *Katodik Koruma Sistemleri*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bölük, F.M. (2006). *Ereğli Yüksek Basınç Doğalgaz Boru Hattının Katodik Koruma Sisteminin Değişik Anot Materyalleri Kullanılarak Optimizasyonu*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çizmecioğlu, Z. (1998). Korozyon ve Katodik Korunma. *İGDAŞ Bülteni*, Sayı 27.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2008). *Çelik Boru Şartnamesi*. Ankara.
- Elçiçek, H., Karaoğlu, A.C. ve Demirel, B. (2011). Gemicilik Endüstrisinde Korozyon Problemi ve Katodik Koruma Uygulamaları. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18, 436-441.
- Laque, F. L. (1975). *Deniz Korozyonu, Nedenleri ve Önlenmesi*. John Wiley and Sons, Inc.
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion Engineering* (Third Edition). McGraw- Hill.
- Görenler, A. (2007). *Al-Si Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gülensoy, B.A. (2006). *Doğalgaz Boru Hatlarında Uygulanan Korozyon Tedbirleri ve Kayseri Doğalgaz Hatlarındaki Uygulamaların İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- <http://www.akat.net/sistemler.html>. (Erişim tarihi: 10 Şubat 2013)
- <http://www.arkatodikkoruma.com/faydali-bilgiler/katodik-koruma-bilgileri> (Erişim tarihi: 9 Ocak 2013)
- <http://www.esenmetal.net/urunler.htm> (Erişim tarihi: 25 Kasım 2012)
- <http://www.kortek.com.tr>. (Erişim tarihi: 18 Nisan 2013)
- İller Bankası Genel Müdürlüğü İçmesuyu ve Kanalizasyon Daireleri Başkanlıkları. (2005). *İçmesuyu ve Kanalizasyon Tesislerinde Motopomp, Hava Kazanı, Hidrofor, Türbin Seçim ve Hesapları, Motopomp, Katodik Koruma, Klorlama Montaj, İşletme ve Bakım Seminer Notları*. Ankara, 305-388.
- Koç, T., Yıldırım, O. ve Ray, A.B. (2004). Boru Hatları Katodik Koruma Sistemlerinde Akım İhtiyacı ve Ölçülmesi. *9th International Corrosion Symposium and Exhibition*. Ankara, 678-699.
- Mutlu, Y. (2010). *İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Katodik Koruma Uygulamaları ve Ekonomik Analiz*. (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Odabaşı, T. (2004). *Katodik Koruma Sisteminin Tanıtımı*. [http://www.etmd.org.tr/teknik\\_yazilar.php](http://www.etmd.org.tr/teknik_yazilar.php). (Erişim tarihi: 11 Aralık 2012)

- Odabaşı, T. (2005). *Boru Hatlarında Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sisteminin Hesabı*. İstanbul: Botaş Yayınları.
- Revie, R. W. and Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering* (10th edition). New Jersey: John Wiley and Sons Inc.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2013). MEGEP, *Korozyon ve Katodik Koruma*. <http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/kimya/moduller/KorozyonVeKatodikKoruma.pdf>. (Erişim tarihi: 30 Ocak 2013)
- TS 5141. (1987). *Yeraltı Çelik Boru Hatlarının Katodik Korunması Kuralları* (1. baskı). Ankara: TSE.
- TS 9234. (1991). *Katodik Koruma-Galvanik Anotlar* (1. baskı). Ankara: TSE.
- Üneri, S. (2000). *Korozyon ve Önlenmesi* (2. baskı). Ankara: Korozyon Derneği Yayınevi.
- William, D. C. and David, G. R. (2013). *Materials Science and Engineering* ( 9th). Lova, Utah: Wiley.
- Yalçın, H. ve Koç, T. (1991). *Korozyon ve Katodik Koruma*. Ankara: Palme Yayınları.
- Yalçın, H. ve Koç, T. (1997). *Mühendisler için korozyon*. Ankara: Kimya Mühendisleri Odası.
- Yalçın, H. ve Koç, T. (1999). *Katodik Koruma*. Ankara: Palme Yayınları.
- Yavuz, H. (2001). Katodik Koruma Proje Hesapları. *İller Bankası Genel Müdürlüğü İçmesuyu Dairesi Başkanlığı İçmesuyu ve Arıtma Tesisi İnşaatlarında Sözleşme Uygulamaları Semineri*. Ankara.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Tayfun Karagöz  
E-Posta : tyfnkrz@gmail.com

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2010-2014, Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- 2016-....., Makine Mühendisi, Adalya Doğalgaz
- 2015-2016, Mekanik tesisat kısım şefi, Majesty La Mer Art Hotel
- 2015, Saha Şef Mühendisi, Elektrolux
- 2014-2015, Teknik Müdür Yardımcısı, Nazar Beach Hotel

### Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2014, Dizel ve Benzinli Motorlardaki Teknolojik Gelişmeler, Bitirme Projesi, Hatay

### Yabancı Dil Bilgisi:

İngilizce, Almanca

### Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2014, Makine Mühendisleri Odası, Antalya