

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ

GÖKHAN BIYIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. NURETTİN UMURKAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ

Gökhan BIYIK tarafından hazırlanan tez çalışması 20.08.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ercan İZGİ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nazmi EKREN

Marmara Üniversitesi

ÖNSÖZ

Katodik koruma konusu Elektrik Mühendisliği alanında özel bir konu olmakla birlikte disiplinler arası bir alana giren bir konudur.

“Katodik Koruma Sistemleri” isimli bu çalışmada metal yapıları korozyona karşı korumada en etkili yöntem olan katodik koruma sistemleri incelenmiş ve örnek tasarım çalışmalarına yer verilmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Nurettin UMURKAN’a ve Elektrik Mühendisi Sayın Yıldıray YILDIRIMA’a teşekkür ederim.

Son olarak maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama ve eşime teşekkür ederim

Mayıs, 2013

Gökhan BIYIK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
KOROZYON	6
2.1 Korozyonun Tanımı	8
2.2 Korozyon Etkenleri	8
2.2.1 Fiziksel ve Kimyasal Etkenler	8
2.2.2 Çevresel Etkenler	10
2.2.3 Elektrokimyasal Etkenler	10
2.2.4 Diğer Etkenler	12
2.3 Korozyon Tepkimeleri	12
2.3.1 Metallerin Korozyon Eğilimleri	15
2.3.2 Korozyon Hücresi ve Akımı	22
2.3.3 Korozyon Hız Birimleri	25
2.4 Korozyon Tipleri	30
2.4.1 Yüzeysel Korozyon	31
2.4.2 Galvanik Korozyon	31
2.4.3 Taneler Arası Korozyon	32

2.4.4	Pullanma Korozyonu	33
2.4.5	Çatlak Korozyonu	34
2.4.6	Çukur Korozyonu	34
2.4.7	Seçimli Korozyon	35
2.4.8	Erozyon Korozyonu	35
2.4.9	Biyolojik Korozyon	35
2.4.10	Kaplama Bozukluğu Korozyonu	36
2.4.11	Gerilmeli Korozyon	36
2.4.12	Yorulma Korozyonu	37
2.4.13	Kavitasyon Korozyonu	37
2.4.14	Bıçak Çizgisi Korozyonu	38
2.4.15	Aralık Korozyonu	38
2.4.16	Kaçak Akım Korozyonu	38
2.5	Korozyondan Korunma Yolları	42
2.5.1	Uygun Malzeme Seçimi	42
2.5.2	Uygun Sistem Tasarımı	43
2.5.3	Koruyucu Kaplama	44
2.5.3.1	Boyayla Koruma	45
2.5.3.2	Metalik Kaplamayla Koruma	45
2.5.3.3	İnorganik Kaplamalar	46
2.5.3.4	Ziftleme	46
2.5.3.5	Üç Katlı PE (Polietilen) Kaplama	46
2.5.3.6	Biyolojik Kaplama	47
2.5.4	İnhibitörle Koruma	48
2.5.5	Anodik ve Katodik Koruma	48

BÖLÜM 3

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ	50
3.1 Katodik Koruma Esasları	51
3.1.1 – 850 mV Kriteri	53
3.1.2 300 mV Potansiyel Kayması	54
3.1.3 100 mV Polarizasyon Kayması	54
3.1.4 Tafel Bölgesi Başlama Noktası	54
3.2 Katodik Koruma Yöntemleri	56
3.2.1 Galvanik Anotlu Katodik Koruma	56
3.2.1.1 Galvanik Anotlar	58
3.2.1.2 Galvanik Anot Yatakları	69
3.2.1.3 Galvanik Anot Seçimi	71
3.2.1.4 Galvanik Anotların Ömrü	72
3.2.1.5 Galvanik Anotların Montajı	74
3.2.1.6 Galvanik Anot Yatağı Direnci	78
3.2.2 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma	81
3.2.2.1 Yardımcı Anotlar	82
3.2.2.2 Yardımcı Anotların Ömrü	89
3.2.2.3 Yardımcı Anotların Montajı	90
3.2.2.4 Yardımcı Anot Yatağının Direnci	98
3.2.2.5 Transformatör/Redresör Ünitesi	109
3.3 Katodik Koruma Sistemlerinin Karşılaştırılması	114

BÖLÜM 4

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİNİN TASARIMI.....	116
4.1 Zemin Etüt Çalışmalar.....	116
4.1.1 Zemin Özgül Direncinin Belirlenmesi	116
4.1.1.1 Wenner Dört Elektrot Yöntemi	120
4.1.1.2 Toprak Kutusu Yöntemi	121
4.1.2 Zemin pH Değerinin Belirlenmesi	122
4.1.3 Zemin Redoks Potansiyelinin Belirlenmesi	123
4.2 Katodik Olarak Korunacak Yapının Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi	124
4.3 Katodik Koruma Akım İhtiyacının Belirlenmesi	127
4.3.1 Akım İhtiyacının Tahmini Olarak Belirlenmesi.....	127
4.3.2 V.S. Kalman Eğrisi İle Akım İhtiyacının Belirlenmesi.....	131
4.3.3 Akım İhtiyacının Hesaplanması	133
4.3.3.1 Sonlu Boru Hattının Akım İhtiyacı	134
4.3.3.2 Sonsuz Boru Hattının Akım İhtiyacı	138
4.4 Katodik Koruma Yönteminin Seçimi.....	140
4.5 Anot Yatağının Tasarımı	140
4.6 Transformator/Redresör Ünitesinin Akım ve Gerilim Değerlerinin Tespiti	141
4.7 Tasarım Çalışmaları.....	143
4.7.1 Siemens İçme Suyu Paket Arıtma Tesisi Çelik Borularının Korunması.....	143
4.7.1.1 Boru Hattı Karakteristikleri	143
4.7.1.2 Zemin Etüt Çalışmaları.....	143
4.7.1.3 Akım İhtiyacının Belirlenmesi	145
4.7.1.4 Anot Yatağı Tasarımı	145
4.7.1.5 Diğer Malzemelerin Seçimi.....	148
4.7.1.6 Metraj Listesi.....	150
4.7.2 Kandıra Namazgâh Barajı Terfi Hattı Çelik Borularının Korunması.....	150
4.7.2.1 Zemin Etüdünün Yapılması.....	150
4.7.2.2 Boru Hattı Karakteristikleri	151
4.7.2.3 Akım İhtiyacının Belirlenmesi	152
4.7.2.4 Anot Yatağı Tasarımı	153
4.7.2.5 Transformator/Redresör Ünitesinin Tasarımı.....	155
4.7.2.6 Diğer Malzemelerin Seçimi.....	156
4.7.2.7 Metraj Listesi.....	161

BÖLÜM 5

KATODİK KORUMA TESİSLERİNDE İŞLETME VE BAKIM.....	162
5.1 Galvanik Anotlu Tesislerde İşletme ve Bakım.....	162
5.2 Dış Akım Kaynaklı Tesislerde İşletme ve Bakım	167

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER	172
KAYNAKLAR.....	173
ÖZGEÇMİŞ.....	175

SİMGE LİSTESİ

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat olarak sıcaklık ölçü birimi
e	Elektron
$^{\circ}\text{F}$	Fahrenayt olarak sıcaklık ölçü birimi
$K_{\text{ç}}$	Çözünürlük çarpımı
$\log$	Logaritma
M_A	Atom kütlesi
π	Pi Sayısı
μ	Mikro (milyonda bir birim)
ρ	Özgül direnç
ΔH	Zaman aralığının uzunluğu
Ω	Direnç ölçü birimi, Ohm

KISALTMA LİSTESİ

A	Amper
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
AG	Alçak Gerilim
A.Ş.	Anonim Şirketi
BOTAŞ	Boru Hatları İle Petrol Taşıma Anonim Şirketi
DC	Direk Current (Doğru Akım)
DN	Diameter Nominal (Nominal Çap)
DIN	Das Ist Norm (Alman Endüstri Standardı)
DSİ	Devlet Su İşleri
EP	Epoksi
GSMH	Gayri Safi Milli Hasıla
İGDAŞ	İstanbul Gaz Dağıtım Anonim Şirketi
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
kV	Kilo Volt
kVA	Kilo Volt Amper
lb	Libre
LİDA	Lineer Dağılımlı Anot
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
NACE	National Association of Corrosion Engineers (Korozyon Mühendisleri Ulusal Birliği)
NATO	North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Teşkilatı)
PE	Polietilen
pH	Power of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)
PUR	Poliüretan
PVC	Polivinil Klorür
TCK	Türkiye Cumhuriyeti Karayolları
T/R	Transformatör/Redresör
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
V	Volt
VA	Volt Amper
YG	Yüksek Gerilim
YP	Yüksek Potansiyelli

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Demirin çevrimi	6
Şekil 2.2 Korozyon maliyetinin ABD GSMH içerisindeki payı	7
Şekil 2.3 Demir metalinde meydana gelen korozyon.....	8
Şekil 2.4 Saf demirin korozyon diyagramı.....	9
Şekil 2.5 Basit kuru pil	11
Şekil 2.6 Korozyon tepkimesinin oluşumu	13
Şekil 2.7 Kaplamasız çıplak çelik boru yüzeyi.....	14
Şekil 2.8 Anot-katot bölgelerinin oluşumu	14
Şekil 2.9 Pas oluşumu.....	14
Şekil 2.10 Metalik yapının delinmesi	15
Şekil 2.11 Sn-Pb pili.....	18
Şekil 2.12 Korozyon hücresinin devre şeması [11].....	22
Şekil 2.13 Metalin elektrolit içerisinde iyonlaşması ve denge durumu.....	23
Şekil 2.14 Korozyon hücresinde denge durumu.....	24
Şekil 2.15 Gemi halatı bağlantı gemi	31
Şekil 2.16 Galvanik korozyonun oluşumu ve önlenmesi	32
Şekil 2.17 Taneler arası korozyon	33
Şekil 2.18 Alüminyum gövde kirişi üzerinde pullanma korozyonu.....	33
Şekil 2.19 Çatlak korozyonunun oluşumu ve çatlak	34
Şekil 2.20 Çukur korozyonu.....	34
Şekil 2.21 Borunun dış ve iç görünümü ile erozyon korozyonu	35
Şekil 2.22 Kaplama bozukluğunun neden olduğu korozyon.....	36
Şekil 2.23 Gerilmeli korozyon.....	37
Şekil 2.24 Kavite korozyonu.....	37
Şekil 2.25 Farklı görünümde aralık korozyonları	38
Şekil 2.26 Doğru akım taşıma sisteminin neden olduğu kaçak akım korozyonu.....	39
Şekil 2.27 Doğru akım kaynak işleminin neden olduğu kaçak akım korozyonu	39
Şekil 2.28 Katodik koruma sisteminin yol açtığı korozyon	40
Şekil 2.29 Direkt bağlama yöntemi	40
Şekil 2.30 Etkilenen boruya galvanik anotlar bağlanması	41
Şekil 2.31 Üç katlı PE kaplama	47
Şekil 3.1 Elektrokimyasal hücre	51
Şekil 3.2 Metalin korozyonu ve katodik koruması.....	52
Şekil 3.3 Demir-su sistemi için Pourbaix diyagramı.....	53
Şekil 3.4 Tafel bölgesi başlama noktası	54
Şekil 3.5 Katodik koruma potansiyel kriterleri	55
Şekil 3.6 Galvanik anotlu katodik koruma sistemi.....	57
Şekil 3.7 Magnezyum anot	59
Şekil 3.8 Kara yapıları için magnezyum anotlu galvanik katodik koruma şeması.....	59

Şekil 3.9 D profilli magnezyum anot	61
Şekil 3.10 Magnezyum anotların akım verimini akım yoğunluğuna göre değişimi	64
Şekil 3.11 Zemin için çinko anot profili.....	65
Şekil 3.12 Deniz için çinko anot profili.....	66
Şekil 3.13 Deniz içi yapılar için alüminyum anot profili	67
Şekil 3.14 Paket galvanik anot	70
Şekil 3.15 Galvanik anotların yerleştirilme planı.....	75
Şekil 3.16 Galvanik anotların boru seviyesi altına yerleştirilmesi	75
Şekil 3.17 Çok sayıda galvanik anodun yerleştirilmesi.....	76
Şekil 3.18 Toprak üzeri ölçü kutusu.....	77
Şekil 3.19 Ölçü kutusunun iç yapısı	78
Şekil 3.20 Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi	81
Şekil 3.21 100 lb (42,5 kg) demir silikon anot	84
Şekil 3.22 LİDA anot dizisi.....	86
Şekil 3.23 Yardımcı anotların sıg anot yataklarına yatay yerleştirilmesi.....	93
Şekil 3.24 Yardımcı anotların sıg anot yataklarına dikey yerleştirilmesi.....	94
Şekil 3.25 Sondaj makinesi ile derin kuyu açılması.....	95
Şekil 3.26 Derin kuyu anot yatağı	96
Şekil 3.27 Yardımcı anotların ekonomik yatak direnci sınırını belirleme grafiği.....	98
Şekil 3.28 I_1 ve I_2 uzunluklarına sahip dikdörtgenin alanına eşdeğer dairenin çapı	100
Şekil 3.29 Yatay olarak yerleştirilmiş anotların sıg anot yatağının kesit görünüşü	101
Şekil 3.30 Dikey olarak yerleştirilmiş anotların sıg anot yatağının kesit görünüşü.....	104
Şekil 3.31 Yatay olarak yerleştirilmiş anotların üniform anot yatağının kesit görünüşü	106
Şekil 3.32 Redresör panosu beslemesi	109
Şekil 3.33 T/R ünitesi bağlantı şeması	110
Şekil 3.34 Yarım dalga ve tam dalga redresör üniteleri	111
Şekil 3.35 Bakır/bakır sülfat referans elektrodu	112
Şekil 3.36 Diyot soğutucu boyutları	113
Şekil 3.37 T/R ünitesi panosu.....	113
Şekil 4.1 Zemin özgül direncinin rutubet oranına göre değişimi	117
Şekil 4.2 Wenner dört elektrot sistemi	121
Şekil 4.3 Toprak kutusu.....	122
Şekil 4.4 Çeşitli ortamlara ve kaplama cinsine göre yaklaşık akım ihtiyacı değerleri.....	128
Şekil 4.5 Kaplama direnci tespiti için deney düzeneği.....	130
Şekil 4.6 V.S. Kalman eğrisi	131
Şekil 4.7 İzole flanşlı boru hattının akım-gerilim grafiği.....	134
Şekil 4.8 Sonlu ve sonsuz boru hattının akım-gerilim değişimi grafiği	136
Şekil 4.9 Katodik koruma sisteminin seçim grafiği	140
Şekil 4.10 Dış akım kaynaklı katodik koruma devresi.....	142
Şekil 4.11 Ekonomik kablo seçim grafiği	142
Şekil 4.12 Boru hatlarının görünümü	147
Şekil 4.13 1. Kısım anot yerleşimi	148
Şekil 4.14 2. Kısım anot yerleşimi	148
Şekil 4.15 İzole flanş [23].....	149
Şekil 4.16 Ölçü kutusu [23].....	149
Şekil 4.17 Yardımcı anot yatağı kesiti	153
Şekil 4.18 Katodik koruma devresinde dirençler	155
Şekil 4.19 Katodik koruma istasyonunda kablolar.....	156
Şekil 4.20 AYS, AYB ve Drenaj ölçü kutuları detayları	157
Şekil 4.21 Hat ölçü kutusu detayı.....	158
Şekil 4.22 Bakır / bakır sülfat elektrodu.....	159
Şekil 4.23 Anot yatağı ve T/R ünitesinin görünüşü	160

Şekil 5.1 Sistem / toprak potansiyelinin ölçülmesi.....	163
Şekil 5.2 Metal yapı / toprak potansiyelinin ölçülmesi	164
Şekil 5.3 Anot / toprak potansiyelinin ölçülmesi	164
Şekil 5.4 Anot akımının ölçülmesi	165
Şekil 5.5 Polarite tayini ve akım drenaj noktası potansiyelinin belirlenmesi.....	168
Şekil 5.6 Hat ölçü kutusu bağlantı şeması.....	169
Şekil 5.7 Anot yatağı sonu ölçü kutusu bağlantı şeması	170
Şekil 5.8 Anot yatağı başı ölçü kutusu bağlantı şeması	170
Şekil 5.9 Diyot test devresi bağlantı şeması	171

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Zeminin elektriksel özgül direncine göre korozyonluk sıralaması [12]	10
Çizelge 2.2	Anodik ve katodik tepkimeler	13
Çizelge 2.3	Nernst skalası	16
Çizelge 2.4	Referans elektroda göre koruma potansiyelleri.....	19
Çizelge 2.5	Çeşitli metal ve alaşımların Cu/CuSO ₄ elektroduna göre potansiyelleri	21
Çizelge 2.6	Değişik korozyon hızlarının birbirine dönüştürme faktörleri [13].....	25
Çizelge 2.7	Korozyon hızına göre malzemenin dayanıklılık durumu	26
Çizelge 2.8	Metal/alaşım tipleri ve korozyona yatkınlıkları [13].....	30
Çizelge 2.9	Sık rastlanan galvanik çiftlerin korozyon davranışları.....	32
Çizelge 2.10	Çeşitli korozyon ortamlara göre kullanılabilecek malzemeler [20].....	43
Çizelge 2.11	Anodik ve katodik korumanın karşılaştırılması [20].....	49
Çizelge 3.1	Galvanik anotların özgül dirence göre kullanım sınırları [19].....	58
Çizelge 3.2	Magnezyum anotların elektrokimyasal özellikleri [21]	60
Çizelge 3.3	Magnezyum anotların kimyasal özellikleri	61
Çizelge 3.4	Türk Standardı magnezyum anot boyutları [22]	62
Çizelge 3.5	NACE Standardı AZ-63 tip magnezyum anotların boyutları [11].....	62
Çizelge 3.6	NACE Standardı Yüksek potansiyelli magnezyum anotların boyutları [11].....	63
Çizelge 3.7	Çinko anotların elektrokimyasal özellikleri [21].....	65
Çizelge 3.8	Zemin içerisinde kullanılan çinko anotların boyutları	65
Çizelge 3.9	Deniz içerisinde kullanılan çinko anotların boyutları	66
Çizelge 3.10	Alüminyum anotların elektrokimyasal özellikleri [11]	67
Çizelge 3.11	Türk Standardı deniz içi yapılar için alüminyum anotların boyutları [22]	68
Çizelge 3.12	Toprak elektrik özgül direncine göre tavsiye edilen anot ağırlıkları.....	69
Çizelge 3.13	Anot yatağı dolgu malzemesi	70
Çizelge 3.14	Kromlu ve kromsuz demir-silikon anotların kimyasal bileşimleri.....	83
Çizelge 3.15	TS-5141'e göre demir-silikon anot boyutları [12]	84
Çizelge 3.16	Platin kaplanmış titanyum anot boyutları [11].....	85
Çizelge 3.17	Metal oksit titanyum anotların akım ve ortam özgül direnci değerleri [25]	86
Çizelge 3.18	Metal oksit titanyum anotların boyutları ve çıkış akımı değerleri [11].....	87
Çizelge 3.19	Yardımcı anotların başlıca özellikleri [11].....	88
Çizelge 3.20	Yardımcı anotların kullanma faktörleri ve maks. DC çıkış potansiyelleri [5]...	88
Çizelge 3.21	Metal oksit titanyum anotların akım değerine göre ömürleri.....	90
Çizelge 3.22	Yardımcı anot yatağı dolgu maddesi olarak kullanılan kok tozu.....	91
Çizelge 4.1	Zeminin elektriksel özgül direncine göre korozyonluk dereceleri	117
Çizelge 4.2	pH değerine göre zeminin değerlendirilmesi	123
Çizelge 4.3	Redoks potansiyeline göre zeminin korozyonluk özelliği.....	123
Çizelge 4.4	Polietilen kaplı çelik boruların minimum kaplama kalınlıkları [26].....	124
Çizelge 4.5	Kaplama çeşidine göre kaplama direnci değerleri	125
Çizelge 4.6	Zemin özgül direncine göre kaplama dirençleri.....	126

Çizelge 4.7	Çıplak çelik yapıların zemin özgül direncine göre ortalama akım ihtiyacı [12]	127
Çizelge 4.8	Bazı ortamlara göre ortalama akım ihtiyacı [1,27].....	128
Çizelge 4.9	Kaplama cinsine göre ortalama akım ihtiyacı [12,27]	129
Çizelge 4.10	Kaplama direncine göre ortalama akım ihtiyacı [11].....	129
Çizelge 4.11	Kaplama cinsine göre tahsis faktörleri [28]	132
Çizelge 4.12	V.S. Kalman eğrisine göre özgül direnç ve akım değerleri [28].....	132
Çizelge 4.13	Boru hattının karakteristikleri	143
Çizelge 4.14	Zeminin özgül direnç değerleri	144
Çizelge 4.15	pH ve redoks potansiyeli değerleri.....	144
Çizelge 4.16	Metraj listesi	150
Çizelge 4.17	Boru hattına ait uzunluk ve alan bilgileri	151
Çizelge 4.18	Ölçü kutularının yerleştirileceği noktalar.....	158
Çizelge 4.19	Metraj listesi	161

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ

Gökhan BIYIK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Korozyon, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu malzeme yüzeyinden başlayarak, malzeme derinliklerine doğru tesir ederek devam eden ve malzeme özelliğinin değişmesine yol açan bir bozunma sürecidir. Bu süreç büyük zararlara yol açarak önemli israf kalemlerinden birini oluşturmaktadır.

Çoğu temel metaller ne yazık ki kararlı değildir. Olumsuz ortamlarda korozyonun değişik oranlarıyla bozulabilirler. Korozyon reaksiyonu ve hangi metallere nasıl etki yaptığı büyük ekonomik anlam taşımaktadır. Katodik korumanın aşamaları bilimsel olarak diğer koruma sistemlerine göre daha kısa açıklanabilir. Prensip olarak sıvı veya sulu ortamlardaki metallerin korozyonunun çözümü elektriksel gerilimle kontrol edilen elektrokimyasal bir prosestir. Elektrokimya yasalarına göre reaksiyonun yönü ve oranı potansiyelin düşüşü ile birlikte azalacaktır. Tüm bu ilişkiler yüzyıldır bilinmesine rağmen katodik koruma sınırlı bir alanda kullanılmaktadır, uygulamalar genişletilmelidir. Katodik koruma elektrik mühendisliği alanında halen garip ve yabancı olarak görülüp geri planda kalmaktadır.

Sıvılarla ve suyla temas eden malzemelerde katodik koruma genel olarak kullanılan tek yöntemdir. Fakat gelecekte endüstriyel alanlarda daha çok kullanılacaktır.

Anahtar kelimeler: Katodik koruma, korozyon, anot, katot, galvanik, dış akım

ABSTRACT

CATHODIC PROTECTION SYSTEMS

Gökhan BIYIK

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Corrosion damages occur due to the chemical and electrochemical reactions by causing materials' properties to degrade.

The processes of cathodic protection can be scientifically explained far more concisely than many other protective systems. Corrosion of metals in aqueous solutions or in the soil is principally an electrolytic process controlled by an electric tension, i.e., the potential of a metal in an electrolytic solution. According to the laws of electrochemistry, the reaction tendency and the rate of reaction will decrease with reducing potential. Although these relationships have been known for more than a century and although cathodic protection has been practiced in isolated cases for a long time, it required an extended period for its technical application on a wider scale. This may have been because cathodic protection used to appear curious and strange, and the electrical engineering requirements hindered its practical application.

At present cathodic protection is only generally applied for materials in contact with natural waters and soil, but future applications are envisaged for industrial plants and containers.

Keywords: Cathodic protection, corrosion, anode, cathode, galvanic, impressed current

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Korozyonla mücadelenin en güvenilir ve ekonomik yolu olan katodik koruma alanında bütün dünyada ve ülkemizde geniş kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar her geçen gün daha yaygın hale gelmekte ve katodik koruma konusunda faydalanabilececek birçok yerli ve yabancı kaynak ortaya çıkmaktadır.

Koç T. vd.'nin çalışmasına göre katodik koruma ilk olarak 1824 yılında Sir Humphry Davy tarafından Samarang adlı bir harp gemisi üzerinde denenmiştir. Geminin bakır kaplı gövdesi çinko anotlarla korunmuştur. Davy tarafından bilimsel yöntemlerle yapılmış olan bu uygulamada katodik koruma ile bakırın korozyonu tam olarak önlenmiştir. Fakat koruma sonucu bakır iyonlarının toksik etkisi de kalmadığından gemi gövdesi deniz canlıları ve yosundan oluşan bir kabuk ile kaplanmıştır. Bu görüntü katodik korumanın etkisiz kaldığı şeklinde yorumlanmış ve katodik koruma uygulamasından vazgeçilmiştir. Bu uygulamadan yaklaşık yüz yıl sonra, Birleşmiş Milletler'in körfez sahili petrol alanlarında uzak mesafelere boru hatları ile petrol taşınması zorunlu hale gelince, yeraltı boru hatlarındaki korozyonu önlemek amacıyla katodik koruma uygulamalarına yeniden başlanmıştır. Boru hatları üzerinde başlayan katodik koruma uygulamaları 1950'li yıllardan sonra, tanklar, gemiler, su depoları, baraj kapakları, iskele ayakları, betonarme demirleri ve daha birçok metalik yapıya yaygın biçimde uygulanmaya başlanmıştır [1].

Ülkemizde ise ilk katodik koruma uygulamaları 1955 yılında NATO tarafından döşenmiş akaryakıt boru hatlarında uygulanmaya başlamıştır. Sivil kesimdeki ilk uygulama 1972 yılında DSİ tarafından döşenen İzmir-Menemen acil içme suyu projesinde uygulanmıştır [1].

Katodik Koruma Sistemleri isimli bu tezin hazırlanmasında İller Bankası A.Ş.'nin katodik koruma seminer notları, şartnameleri, birim fiyat tarifleri ve İller Bankası A.Ş. kapsamında yürütülen katodik koruma projelerinden sıklıkla faydalanılmıştır. Ayrıca Türk Standartları Enstitüsü'nün (TSE) katodik koruma ile ilgili standartları da tez kapsamında kullanılmıştır.

Yalçın H. ve Koç T., katodik koruma için temel bir el kitabı olarak değerlendirilebileceğimiz Katodik Koruma isimli kitapta katodik koruma konusunda çalışan mühendis ve diğer teknik elemanlar için korozyon ve katodik koruma ile ilgili temel teorik bilgilere, katodik koruma ile ilgili örneklerle ve hesaplamalara yer vermişlerdir.

Odabaşı, T., çalışmalarında katodik koruma sistemini tanıtarak; katodik koruma sisteminin gerekli performansa sahip olup olmadığını ölçme konusunda detaylı bilgilere yer vermiştir. Katodik koruma sisteminin performansı aşağıda belirtilen testler neticesinde anlaşılabilir [2]:

- Koruma seviyesi testi
- Toprak özgül direncinin ölçümü
- Akım ihtiyacı testi
- Boru hattı akımlarının ölçümü
- Enterferans testleri
- Boru hattında kullanılan ekipmanların testi

Maurin, çalışmasında toprak korozyonunu etkileyen faktörleri araştırmıştır. Bunun için zeminin nemini, pH'ını ve rezistivitesini ölçmüştür. Maurin çalışmasında zemin korozyonunun rezistivite, nem yüzdesi ve pH derecesine bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Zemin korozyonunu belirlemek için pratik ve hızlı bir sonuç veren bir formül çıkarmıştır. Formülden de görüleceği gibi zemin korozyonu zemin nem yüzdesi ile doğru orantılı pH ve rezistivite ile ters orantılıdır [3].

$$\%K = 2 \times \frac{10 - \text{pH}}{\sqrt{\rho}} \times (10 + Z) \quad (1.1)$$

- K: zeminin korozyon derecesi,
- ρ : Özgül direnç, Ohm.cm,

- Z: Nem yüzdesidir.

Mutlu, Y., İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) kontrolündeki temiz su çelik isale hatları ile atıksu arıtma tesisleri dahili sistemleri ve deniz deşarj hatlarının korozyona karşı korunması amacıyla tesis edilen katodik koruma sistemlerini ekonomik yönden analizini yapıp işletme performanslarını değerlendirdiği çalışmasında, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin katodik koruma verilerinin regresyon denklemlerinin doğrusal olmadığı sonucuna ulaşmıştır. Bu çalışmaya göre İstanbul'un Asya ve Avrupa yakarında katodik koruma yapılan boru hattı uzunlukları ve alanları yıllar içinde artış göstermekle birlikte, katodik korumaya ayrılan yatırım tutarlarının aynı ölçüde değişmediği sonucuna ulaşılmıştır [4].

Üneri, S., çalışmasında korozyonun temel ilkelerine değinmiş, korozyonu izleme, kaynağı ve türüne tanı koyma ve önleme yollarını tasarlayarak uygulama konularında bilgiler sunmuştur. Ayrıca korozyonun elektrokimyasal olaylarını bir pilde yürüyen olaylar örnek gösterilerek anlatılmış, çalışma sonunda korozyonun izlenmesinin önemine değinilmiştir [5].

Çakır, A. F., çalışmasında korozyon açısından tasarım ve malzeme seçiminin önemine değinmiştir. Uygun malzeme seçimi, koruma, korozyon izleme, ölçme, önceden tahmin etme, tasarım, ortamın ıslah edilmesini korozyon kontrolünde titizlikle üzerinde durulan ve başvurulacak çareler olarak belirlemiştir. Uygun malzeme seçimi ve uygun tasarımı belirleme çalışmalarında göz önünde bulundurulması gerekli hususları etraflıca incelendiği bu çalışmada, değişik korozyon türleri, detaya inilmeden sadece temel esaslar yönünden kısaca açıklanmış ve bunların önlenmesine yönelik olarak yapılacak malzeme seçimi ve uygulanabilir tasarım esasları ele alınmıştır [6].

Metin E., çalışmasında korozyonun zararlarının azaltılması konusunda BOTAŞ, İSKİ, TCK, İGDAŞ, İller Bankası, DSİ gibi kurumların son yıllarda nitelikli çalışmalar yaptığını belirterek, korozyonun zararını en aza indirecek uygulama olan katodik koruma sistemini örnek hesaplamalara da yer vererek tanıtmıştır [7].

Dwight, H.B., zemin direncinin hesaplanması ile ilgili çalışması sonucunda katodik koruma hesaplarının temel hesaplamaları arasında yer alan anot dirençlerinin hesaplanması için gereken aşağıdaki formülleri elde etmiştir [8].

$$R_{dikey} = \frac{\rho}{2.\pi.L} \cdot \left(\ln \frac{8.L}{d} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (1.2)$$

$$R_{yatay} = \frac{\rho}{2.\pi.L} \left(\ln \frac{4.L}{d} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (1.3)$$

- R_{dikey} : Dik olarak yerleştirilmiş anotların zemin içindeki direnci (Ohm)
- R_{yatay} : Yatay olarak yerleştirilmiş anotların zemin içindeki direnci (Ohm)
- ρ : Zeminin elektrik özgül direnci (Ohm.cm)
- d : Anot çapı (Anot yatağı dahil) (cm)
- L : Anot uzunluğu (Anot yatağı dahil) (cm)

Gurrappa, çalışmasında soğutma suyu sistemlerinde katodik koruma sisteminin gerekliliği, katodik korumanın çeşitleri ve sistemin galvanik anotlu veya dış akım kaynaklı olmasına göre değişen anot çeşitlerini analiz etmiştir. Analizinde galvanik anotlu sistemin, korunacak yüzey alanının küçük olması bu nedenle akım ihtiyacının düşük olması sebebiyle dış akım kaynaklı sisteme göre akım maliyeti bakımından daha uygun olacağı sonucuna ulaşmıştır. Soğutma suyu sisteminde galvanik anot olarak çinko anot, magnezyum anot ve alüminyum anotların kullanılabileceğini fakat akım verimliliği ve maliyet bakımından en uygun anotların çinko anotlar olduğunu belirtmiştir. Ayrıca bu çalışmada iki ayrı sistemin avantajları ve dezavantajlarını belirtmiş, katodik korumanın ekonomisiyle ilgili bir örnek vermiştir, son olarak da değişik uygulamalar için tasarım ve uygun malzemelerin seçiminin önemine değinmiştir. Katodik koruma sistemi seçiminde bu kaynağın sağladığı bilgilerden yararlanılmıştır ve iki sistemin arasındaki farkları belirtmesi bakımından bu çalışma faydalı olmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Ülkemizde korozyon bilinci henüz tam olarak yerleşmemiş olmasına rağmen bu konuda üniversitelerin yaptığı çalışmalar sektöre yol göstermektedir. Korozyonun doğurduğu sonuçlar itibariyle oluşan hasarlar, ihmal edilemeyecek kadar büyük değerlerdedir. Türkiye'deki önlenebilir korozyon miktarı GSMH'nın %1,6'sı kadardır. Bu çalışmanın amacı; korozyondan korunma yolları arasında en etkin yöntem olan katodik koruma ile önlenebilir korozyondan dolayı oluşan ekonomik kayıpları ülke ekonomisine kazanç olarak geri döndürmek için yol göstermektir.

1.3 Hipotez

Katodik koruma metalleri korumak amacıyla kullanılan tek yöntem değildir. Ancak mevcut uygulanabilir sistemler içerisinde en uygun mühendislik çözümü olarak sıkça kullanılan bir yöntemdir. Katodik koruma dışındaki korozyondan koruma yöntemleri sadece korozyonu azaltıcı yöntemlerdir. İyi tasarımı yapılmış bir katodik koruma sistemi ise korozyonu tamamen önleyebilmektedir. İyi bir tasarım için de arazi etüdün iyi yapılması gerekir. Etüt sonuçlarına göre sistemin tasarımının yapılması metal yapıların işletme ömürlerinin uzamasını ve korozyon nedeniyle meydana gelen ekonomik kayıpların en aza inmesini sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

KOROZYON

Birçok metal doğada cevher içerisinde tuz, oksit gibi kararlı bileşikler halinde bulunurlar. Cevher ayrıştırma ve indirgeme işlemlerinden geçirilerek saf haldeki metal elde edilir. Saf haldeki bu metal kararsız bir yapıya sahip olup sürekli olarak tekrar kararlı hale yani ilk cevher haline dönme eğilimi içinde olur.

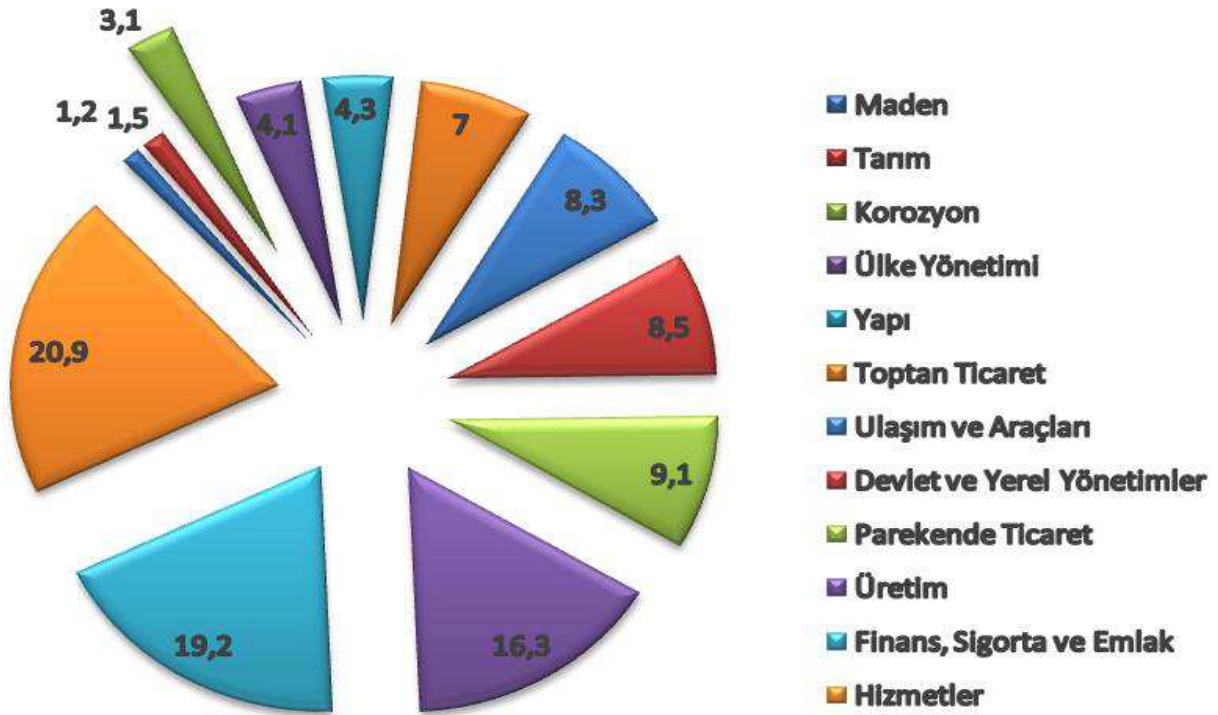


Şekil 2.1 Demirin çevrimi

Metallerin doğadaki ilk cevher hallerine yeniden dönmesi anlamına gelen korozyon, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu malzeme yüzeyinden başlayarak, malzeme

derinliklerine doğru etki ederek devam eden ve malzeme özelliğinin değişmesine yol açan bir bozunma sürecidir. Bu süreç büyük zararlara yol açarak önemli israf kalemlerinden birini oluşturmaktadır.

Korozyon nedeniyle meydana gelen malzeme, enerji ve emek kaybının yıllık oranı ülkeler bazında, gayri safi milli hâsılâtının yaklaşık %5'i düzeyindedir. Bu oran ABD'de 444 milyar \$ ile GSMH'nın %3,1'ne tekabül etmektedir. ABD Donanmasının, donanma korozyon önleme ve kontrol bölümü tarafından hazırlanan 2010 yılı raporunda toplam korozyon maliyeti 7,36 milyar \$ olarak açıklanmıştır [9].



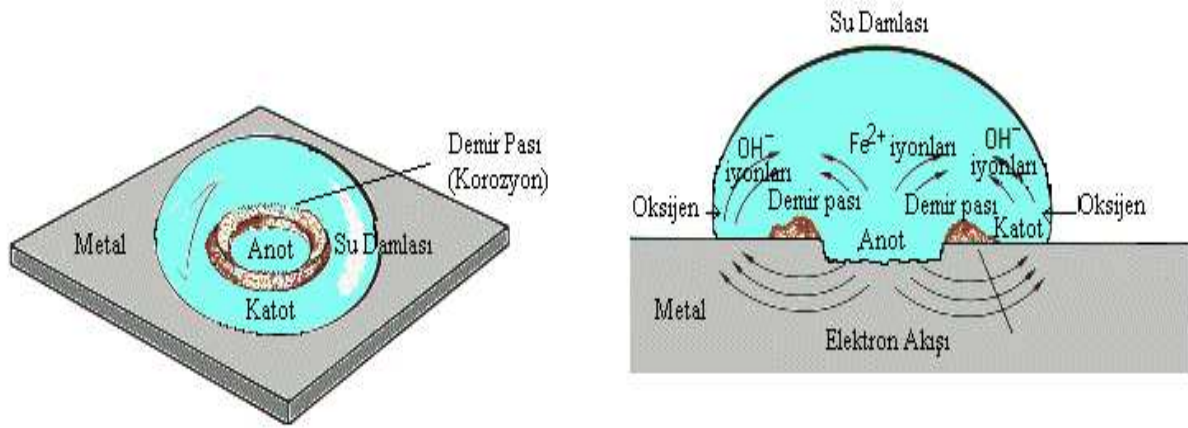
Şekil 2.2 Korozyon maliyetinin ABD GSMH içerisindeki payı

Dünya genelinde korozyon nedeniyle doğrudan uğranılan kaybın yılda yaklaşık 2,2 trilyon \$, Türkiye'de ise yılda yaklaşık olarak 45,6 milyar \$ bir kayıp meydana gelmektedir [6].

Hızla endüstrileşen ülkemizde, her geçen gün yapıların daha da artmaktadır. Fakat korozyona gereken önemin verilmemesi facialara davetiye çıkarıyor. Yapılan bir araştırma sonucu, İzmit depreminde yıkılan binaların %67'sinde korozyon hasarlarının görüldüğü tespit edilmiştir. Resmi rakamlara göre bu hasarlar, 58 bin vatandaşımızın hayatını kaybetmesine, 122 bin vatandaşımızın yaralanmasına ve 411 bin binanın yıkılmasına veya ağır hasar görmesine neden olmuştur. 1999 depreminde korozyon dolayısıyla meydana gelen zararın maddi boyutu kabaca hesaplama yapıldığında, 168 milyar TL civarında olduğu belirtilmektedir [9].

2.1 Korozyonun Tanımı

Korozyon, malzemelerin içinde bulundukları ortamın etkisiyle, kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler neticesinde fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri kapsamında değişime uğramalarıdır [10].



Şekil 2.3 Demir metalinde meydana gelen korozyon

DIN 50900 normuna göre korozyon, metal malzemenin ölçülebilir değişim göstermesine neden olan metal-çevre tepkimesi olarak tanımlanmıştır. Yine aynı normda korozyon zararı ise metal bir yapı parçasının ya da bir bütün sistemin fonksiyonuna verilen zarar olarak tanımlanır [10].

2.2 Korozyon Etkenleri

Korozyon olayı dinamik bir döngü sürecidir. Yani her an, her ortamda metal olan ya da olmayan malzemeler koroziv bir etkiye maruz kalabilirler. Koroziv etkenler fiziksel ve kimyasal, çevresel ve elektrokimyasal etkenler olarak üç ana grup altında toplanabilir.

2.2.1 Fiziksel ve Kimyasal Etkenler

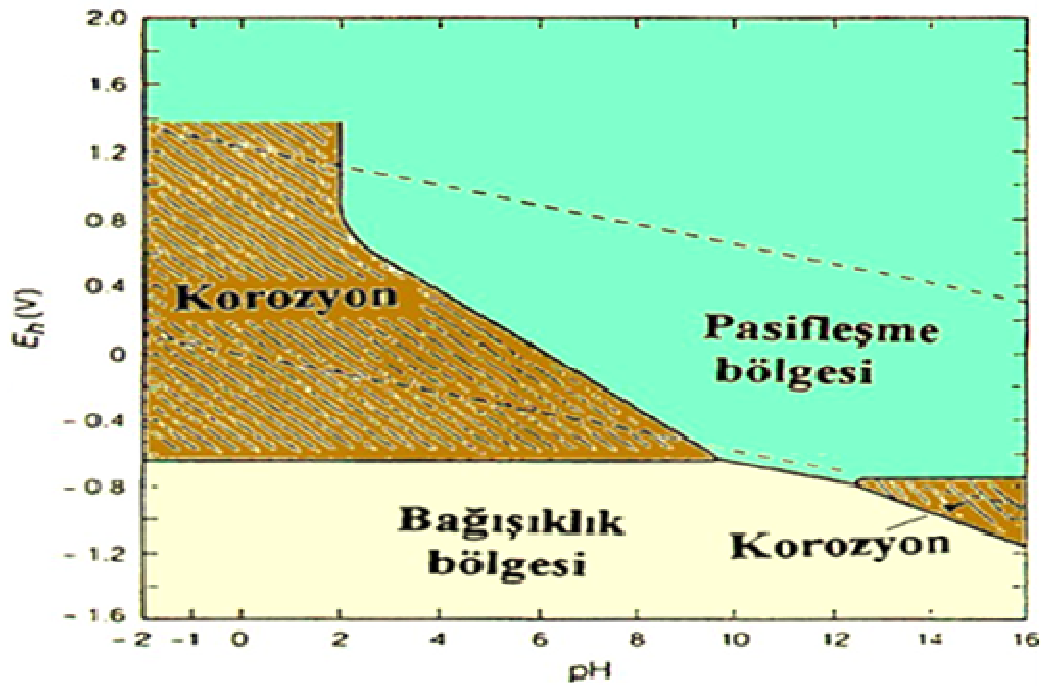
Yüksek basınç ve sıcaklık maddelerin korozyona uğraması için elverişli bir ortam hazırlar. Ortam sıcaklığının veya basıncın artması iyon hareketini artırarak korozyon hızını artırır. Yüksek basınç ve sıcaklık gaz türbinli motorlarda türbin bölümünde doruğa çıkar. Bu durumda türbinler yüksek sıcaklık ve basınca dayanacak ve koroziv etkenlerden en az etkilenecek titanyum malzemesi kullanılarak optimize edilebilir. Bir parça üzerine dayanımından çok daha fazla miktarda yük biniyorsa veya çok yönlü kuvvetlerin etkisi altındaysa korozyona uğraması kaçınılmazdır. Sürtünme ile malzemelerin koruyucu yüzeyleri

tahrip olarak korozyona maruz kalabilirler.

Ortam sıcaklığı -50 ile +50 °C arasında değişen toprak 0 °C derecede donar ve iyon hareket hızı minimuma düşer. Sıcaklığın artmasının oksijen yoğunluğunu düşürücü etkisi de vardır. Fakat bu etki iyon hareketinin artmasından kaynaklanan reaksiyonların yanında oldukça zayıf kalmaktadır.

Metallerin korozyona uğrama hızı büyük ölçüde bulunduğu ortamla ilgilidir. Ortamdaki nem miktarı, asitlik-baziklik durumu, havanın, oksijeninin veya suyun ortam tarafından geçirilebilme yeteneği, kaçak akımlar ve çeşitli bakteriler korozyonu başlatıcı ve hızlandırıcı etken olarak karşımıza çıkar.

Ortamın pH değeri yani asitlik-baziklik durumu korozyon hızını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Şekil 2.4’de saf demirin korozyon davranışı verilmiştir [11].



Şekil 2.4 Saf demirin korozyon diyagramı

Bu diyagramda demir bileşiklerinin oluştuğu kararsız (pasif) bölge, demirin iyon halinde bulunduğu korozyon bölgesi ve demirin serbest metal halinde bulunduğu bağımsızlık bölgesi görülmektedir. Nötr zeminde (pH=7) korozyon, hidrojen indirgenmesi reaksiyonuna bağlı kalmaksızın sadece oksijen indirgenmesi reaksiyonu ile yürüdüğü için korozyon hızı bu ortamlarda pH değerinden etkilenmemektedir. pH değeri 12’den büyük olduğu şartlara toprak zeminde rastlanmaz.

Korozyona etki eden en önemli faktörlerden biri de toprağın elektriksel özgül direncidir. Düşük elektriksel özgül dirençli bölgelerde iletkenliğin yüksek olması iyonik ortamın daha aktif olmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı korozyon mekanizması daha hızlı gelişir.

Çizelge 2.1 Zeminin elektriksel özgül direncine göre koroziflik sıralaması [12]

Zemin Elektrik Özgül Direnci (ρ) (ohm x cm)	Zeminin Korozif Özelliği
$\rho < 1000$	Çok Korozif
$1000 < \rho < 3000$	Korozif
$3000 < \rho < 10000$	Orta Korozif
$10000 < \rho$	Az Korozif

2.2.2 Çevresel Etkenler

Korozyona neden olma açısından coğrafik konuma göre iklim şartları da önemli rol oynar. Sıcaklık-nem etkisi, özellikle tropikal deniz ikliminin görüldüğü bölgeler korozif etkiyi hat safhada arttırmaktadır. Korozyona neden olma açısından coğrafik yerleşime göre iklimler dörde ayrılır. Yüksek sıcaklık ve nemin birlikte etki ettiği en korozif ortam tropikal denizel ortamdır. Bu ortamda korozyon, sıcaklıkla birlikte hızla artar. Sıcaklığın $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında, nemin ise %10–%100 arasında değiştiği ılıman iklimli ve endüstriyel kirlenme, duman ve sis gibi kalıntıları taşıyan ortam endüstriyel ortamdır. Endüstriyel kuruluşlardan yükselen gazlar havanın nemi ile birleşerek asit şeklinde yoğunlaşır ve korozyonu hızlandırır. Sıcaklığın çok düşük olduğu ve düşük elektrokimyasal reaksiyonun olduğu ortam kutupsal ortamdır. Bu ortamda elektrokimyasal ortamın çok düşük olmasına rağmen çok soğuk durumdaki metal ısındığında nem toplar ve bu da metalde korozyon yaratır. Nemin çok düşük olduğu ve korozyon olmadığı tek ortam çöl ortamıdır. Bu ortamda nem olmadığından sıcaklığın etkisi olmaz [13].

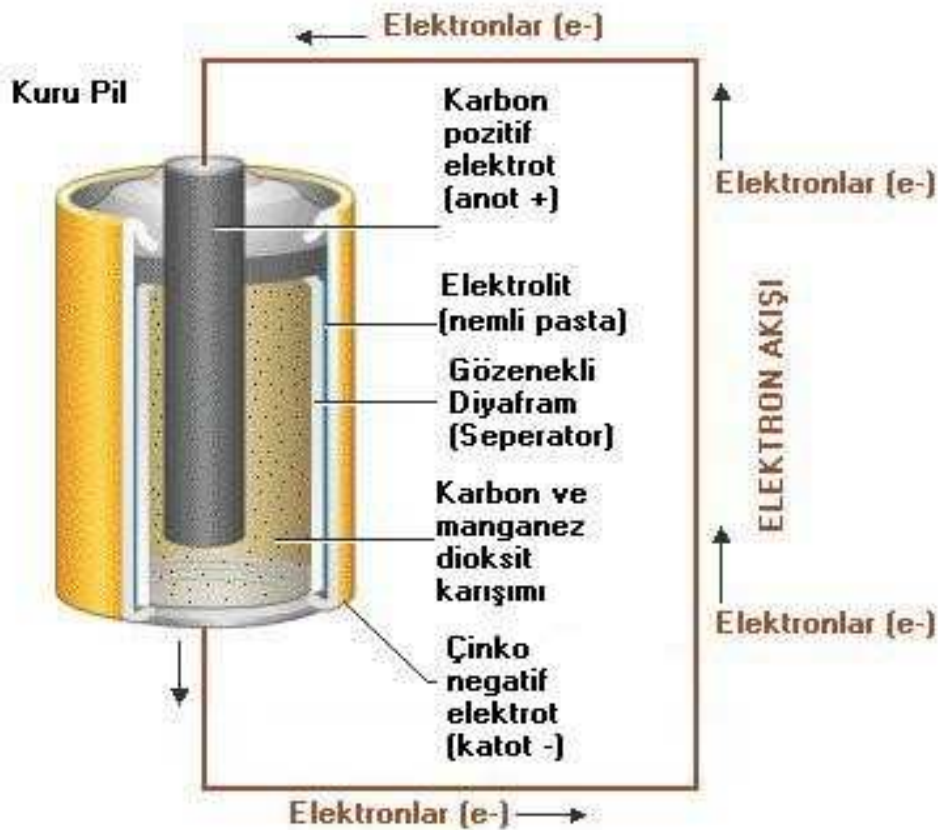
2.2.3 Elektrokimyasal Etkenler

Elektrokimyasal korozyonun olabilmesi için bazı şartların sağlanması gereklidir. Öncelikle metallerle temas eden nemin olması, metallerin elektro potansiyelleri arasında fark olması, oluşan akımın devreyi tamamlaması gerekir. Kısaca bir korozyon hücresinde dört eleman

bulunur. Bu elemanlar anot, katot, metal yolu ve elektrolittir. Bu elemanların biri olmaz ise, korozyon oluşmaz.

Korozyon anotta olur, anodik metal elektrolitte çözünür. Anoda göre daha az aktif olan ve korozyona uğramayan elektrot katottur. Elektronların anottan katoda taşındığı yola metal yolu denir. Uçaklarda metal yolu, uçağın kaplama sacı, bağlantı elemanları, cıvataları veya herhangi bir metalik iletken olabilir. Yeraltı yapılarında görülen korozyonda ise metal yolu topraktır. Korozyon hücrelerini oluşturan elektrolit, nemi içeren iyonize çözeltidir. Korozyon hücrelerinde elektrolit bulunmaz ise metal çözünemediğinden iyon anodik metali terk etmez ve korozyon oluşmaz.

Korozyon hücrelerine örnek olarak karbon-çinko kuru pili verilebilir. Kuru pilin dışı çinkodandır ve iki elektrottan biri olan çinko, katodu oluşturur. Merkezdeki karbon çubuk ise anottur. İki elektrot arasındaki nemli pasta ise elektroliti oluşturur. Korozyon hücrelerinde, korozyon başlaması ve devam etmesi için aynı elemanlar gereklidir.



Şekil 2.5 Basit kuru pil

2.2.4 Diğer Etkenler

Malzeme Seçiminin Etkisi: Korozyona sebep olan etkenlerden biri de birbiriyle potansiyel farkı bulunan metallerin bir arada kullanılmasıdır. Bu durum korozyonu başlatıcı ve hızlandırıcı bir etkidir. Örneğin, çok düşülen bir hata olarak çelik sacdan yapılan panoların üzerine konulan paslanmaz çelik cıvata ve contalar bulundukları bölgede galvanik korozyona sebep olmaktadır. Bu tip durumlarda ana yüzeye cıvatalar ya da contalar plastik ile izole edilmelidir.

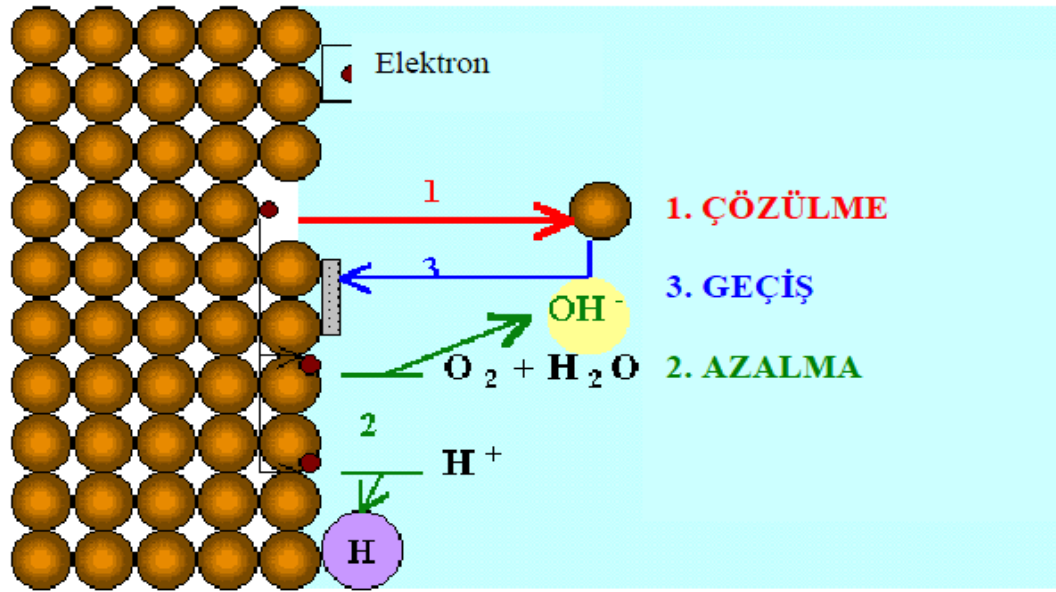
Taneler Arası Özellik Farkları: Metallerin tane boyutları arasındaki farklar ve iki tanedeki farklı konsantrasyonlar neticesinde iki tanenin sınırı, korozyon başlangıcı için uygun bir ortam oluşturur. Çok düşülen bir hata olarak paslanmaz çelik malzemelerden imal edilen tanklar ve benzeri yapılardaki kaynak bölgeleri üretici tarafından hiç beklemediği halde korozyona uğratılmaktadır. Bu korozyonun önüne geçmenin yolu ya elektrotlu kaynak kullanmak ya da önleyici olarak galvanik anotlu katodik koruma sistemi uygulamaktır.

Sistem Dizaynı: Korozi malzemelerin depolandığı sistemlerde korozi ortamın (su vb.) birikmesini önlemeye yönelik tasarımlar uygulanmalıdır. Ayrıca arasında sıvı birikintisine neden olabilecek çok ince aralıklardan kaçınılmalıdır.

Sistemin Bulunduğu Ortamın Oksijen Konsantrasyonu: Aynı tip toprak içerisinde çözünmüş hava konsantrasyonu her yerde aynı olmayabilir. Farklı havalandırma koşullarındaki sistemlerde yan yana duran sistem bir bölgede anot iken hemen yanındaki bölgede katot görevi görerek elektrokimyasal korozyona sebep olabilir.

2.3 Korozyon Tepkimeleri

Korozyon sırasında anodik (elektron veren, yükseltgenme) tepkimeleri ile katodik (elektron alan, indirgenme) tepkimeleri birlikte oluşur. Metalleri korozyonu elektrokimyasal bir olaydır. Kimyasal tepkimelerden ötürü ortaya çıkan elektronlar bir elektrik akımının meydana gelmesini sağlar. Elektrik akımının meydana gelmesi anodik ve katodik tepkimeler sonucunda mümkündür.



Şekil 2.6 Korozyon tepkimesinin oluşumu

Anodik Tepkime: Metalik iletken den iyonik iletkene olan pozitif yük transferini gerçekleştiren elektron tepkimesidir. Anodik tepkime daima bir oksitlenme tepkimesidir.

Örneğin, $Me \rightarrow Me^+ + e^-$

Katodik Tepkime: Metalden elektrolite negatif yükün transfer olduğu elektrot tepkimesi olup daima indirgenme tepkimesidir.

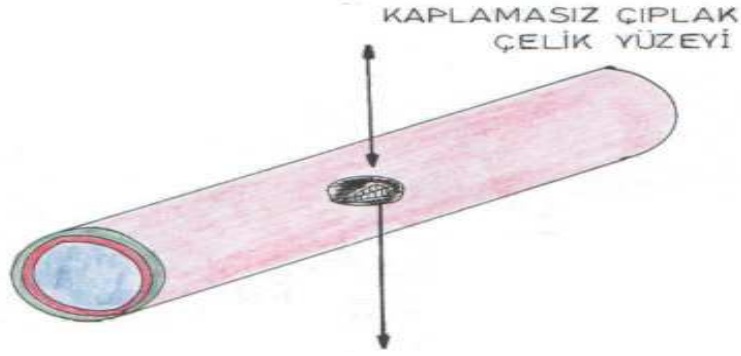
Çizelge 2.2 Anodik ve katodik tepkimeler

Tepkime Türü	Giren Ürün		Çıkan Ürün
Anodik Tepkime	Fe^0	$\longrightarrow$	$Fe^{+2} + 2e^-$ (iyonlaşma)
Katodik Tepkime	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O$	$\longrightarrow$	$2(OH)^-$ (asitli ortamda)
TOPLAM	$Fe^0 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O$	$\longrightarrow$	$Fe(OH)_2$ (pas)

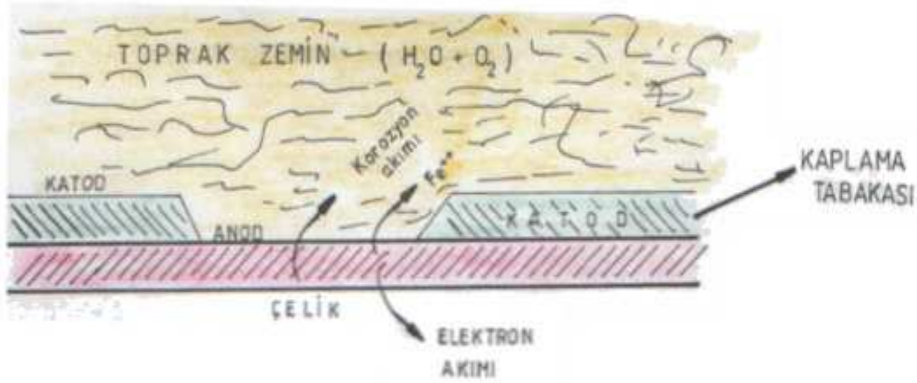
Korozyon olayı bu iki reaksiyonun bir arada yürümesi ile gerçekleşir. Elektronlar anottan katoda doğru metal üzerinden geçmektedir. Sonuçta, metallerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve elektriksel özelliklerinde istenmeyen bazı değişiklikler meydana gelir ve bu değişiklikler bazı zararlara yol açar. Hem metal malzemelerin bozunma reaksiyonuna, hem de bu reaksiyonun neden olduğu zarara korozyon adı verilir. Genel anlamda ise; ortamın kimyasal

ve elektrokimyasal etkilerinden dolayı metalik malzemelerde meydana gelen hasara korozyon denir.

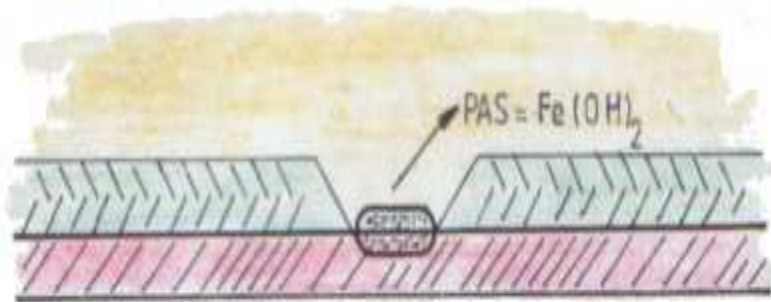
Korozyondan dolayı halk arasında pas olarak bilinen Fe(OH)_2 (Demir Hidroksit) isimli korozyon ürünü oluşur. Metal yüzeyden kopan pas tabakaları, yeni pas tabakalarının oluşmasına ve metalik yapının delinip fonksiyonunu yitirmesine yol açar.



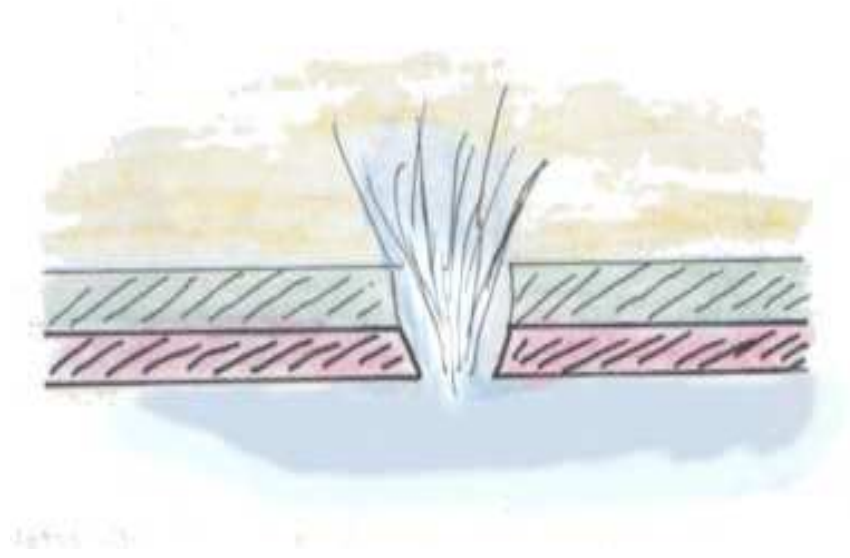
Şekil 2.7 Kaplamasız çıplak çelik boru yüzeyi



Şekil 2.8 Anot-katot bölgelerinin oluşumu



Şekil 2.9 Pas oluşumu



Şekil 2.10 Metalik yapının delinmesi

2.3.1 Metallerin Korozyon Eğilimleri

Metallerin oksitlenme eğilimini Nernst Skalası (Çizelge 2.3) yardımıyla öğrenebiliriz. Bu skala, 1 atmosfer basınç altında ve 25 °C 'de 1 mol/lit iyon sulu çözeltisi hidrojen gazı ile temastaki platin elektrodu standart referans elektrot kabul edilerek, her bir metalin 25 °C'deki çözeltisinde metal ile çözelti arasında ölçülen potansiyel değerlerinin sırasıdır. Nernst Skalası'nda hidrojene göre daha negatif olan metaller daha aktif, yani iyonlaşma eğilimi daha fazla olan metali; hidrojene göre daha pozitif olan metaller ise daha soy, yani iyonlaşma eğilimi daha az olan metali karakterize etmektedir. Bir metalin aktifliği, elektronunu verme eğilimi, diğer bir ifade ile reaksiyona girme eğilimidir. Metaller aktifleştikçe daha kolay korozyona maruz kalır. Nernst Skalası'nda verilen elektrot potansiyelleri, standart potansiyellerdir [7].

Çizelge 2.3 Nernst skalası

Malzeme	Reaksiyon	Standart Elektrot Potansiyeli (mV)
Lityum	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Li}$	- 3030
Potasyum	$\text{K}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{K}$	- 2925
Sodyum	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Na}$	- 2714
Magnezyum	$\text{Mg}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mg}$	- 2371
Alüminyum	$\text{Al}^{+++} + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Al}$	- 1662
Mangan	$\text{Mn}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn}$	- 1050
Çinko	$\text{Zn}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Zn}$	- 760
Krom	$\text{Cr}^{+++} + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cr}$	- 744
Demir	$\text{Fe}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}$	- 440
Kadmiyum	$\text{Cd}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cd}$	- 403
Kobalt	$\text{Co}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Co}$	- 277
Nikel	$\text{Ni}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}$	- 250
Kalay	$\text{Sn}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Sn}$	- 136
Kurşun	$\text{Pb}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}$	- 126
Hidrojen	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$	0
Bakır	$\text{Cu}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu}$	+ 340
Cıva	$\text{Hg}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Hg}$	+ 792
Gümüş	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Ag}$	+ 799
Platin	$\text{Pt}^{++} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pt}$	+ 1200
Altın	$\text{Au}^{+++} + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Au}$	+ 1420

Daha önce korozyon hücrelerini basit pil devrelerine benzetmiştik. Pil devrelerindeki pil gerilimini hesaplamak mümkündür. Bunun için Nernst denklemini kullanabiliriz. Nernst eşitliği en basit hali ile denklem 2.1'deki gibidir [14].

$$E = E^0 - \frac{0,0592 \times (273 + ^\circ\text{C})}{n \times (298)} \times \log \left(\frac{[M_{\text{ind}}]^a}{[M_{\text{yük}}]^b} \right) \text{ Volt} \quad (2.1)$$

- E: Volt cinsinden pil potansiyeli,
- E^0 : Volt cinsinden her bir yarı tepkime için standart elektrot potansiyeli
- n: Alınan veya verilen elektron sayısı
- M_{ind} , $M_{\text{yük}}$: Molar cinsinden indirgen ve yükseltgene ait miktarlar
- a, b: İndirgen ve yükseltgene ait tepkime denklemindeki katsayılar
- $^\circ\text{C}$ = Santigrat cinsinden ortam sıcaklığı

Örnek 2.1

25 $^\circ\text{C}$ ortam sıcaklığında Zn^{2+}/Zn elektrodunun 0,75 M Zn^{2+} derişimindeki elektrot gerilimini bulalım.

E^0 = Çizelge 2.3'den -760 mV = -0,76 V olarak bulunur.

$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$ (İndirgenme yarı tepkimesi)

$$E = -0,76 - \frac{0,0592 \times (273 + 25)}{2 \times (298)} \times \log \left(\frac{1}{[0,75]^1} \right) \text{ Volt}$$

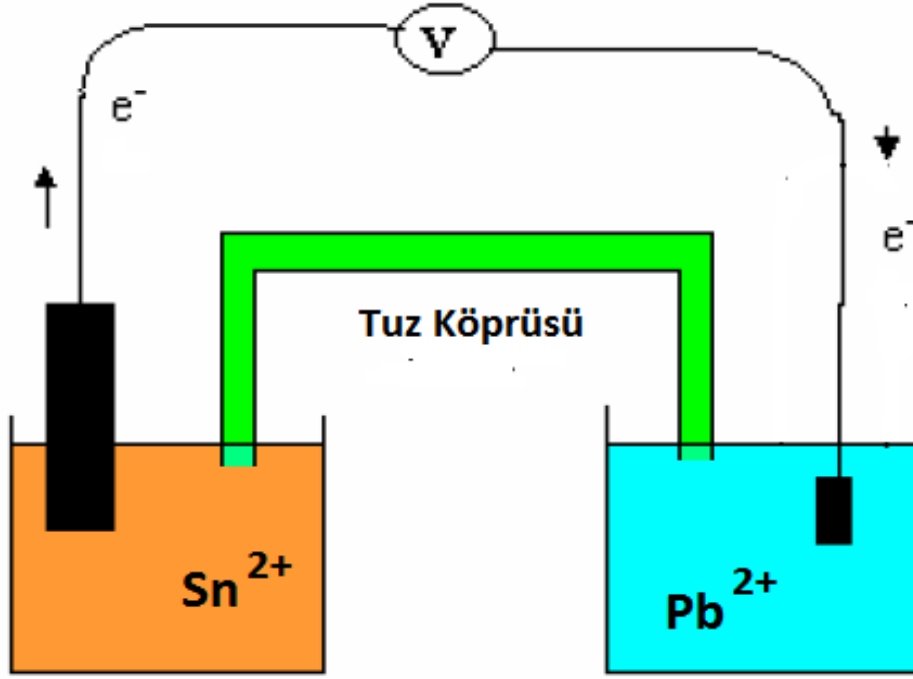
$E = -0,7637 \text{ Volt}$ olarak bulunur.

Örnek 2.2

Şekil 2.11'deki $\text{Sn} | \text{Sn}^{2+} (0,02 \text{ M}) || \text{Pb}^{2+} (0,1 \text{ M}) | \text{Pb}$ pilinin gerilimini bulalım. (20 $^\circ\text{C}$ 'de)

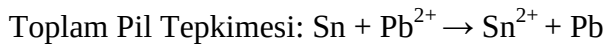
E^0_{Sn} : Çizelge 2.3'den -136 mV = -0,136 V olarak bulunur.

E^0_{Pb} : Çizelge 2.3'den -126 mV = -0,126 V olarak bulunur.



Şekil 2.11 Sn-Pb pili

Bu pil için elektronegatifliği yüksek olan yani negatif yönde standart elektrot potansiyeli daha fazla olan Sn/Sn^{2+} elektrodu anot; Pb/Pb^{2+} elektrodu katot olacaktır. Anotta yükseltgenme, katotta ise indirgenme tepkimeleri meydana gelecektir.



Elektron alan madde indirgenir. İndirgenen madde ise yükseltgen olarak adlandırılır. Bu durumda Sn-Pb pilinin yükseltgeni Pb^{2+} olacaktır.

Elektron veren madde yükseltgenir. Yükseltgen madde ise indirgen olarak adlandırılır. Bu durumda Sn-Pb pilinin indirgeni Sn^{2+} olacaktır.

$$E = (E^0_{\text{katot}} - E^0_{\text{anot}}) - \frac{0,0592 \times (273 + 20)}{2 \times (298)} \times \log \left(\frac{[\text{Sn}^{2+}]^1}{[\text{Pb}^{2+}]^1} \right) \text{ Volt}$$

$$E^0 = E^0_{\text{katot}} - E^0_{\text{anot}} \quad (2.2)$$

$$E^0 = -0,126 - (-0,136) = 0,01 \text{ Volt olarak bulunur.}$$

$$E = (0,01) - \frac{0,0592 \times (293)}{2 \times (298)} \times \log \left(\frac{0,02}{0,1} \right) \text{ Volt}$$

E = 0,0303 Volt olarak bulunur.

E pil potansiyeli değerin pozitif çıkması pilin redoks tepkimelerinin kendiliğinden gerçekleşeceğini yani pilin elektrik akımı üreteceğini gösterir. Eğer pil potansiyeli negatif çıkmış olsaydı redoks tepkimeleri kendiliğinden gerçekleşemeyeceği için pil elektrik akımı üretemeyecekti. Pil potansiyeli sıfır çıkarsa bu redoks tepkimelerinin dengeye ulaştığı anlamına gelir. Bu durum pilin bittiği şeklinde de yorumlanabilir [15].

Nernst Skalası'nda verilen değerler ile pil devreleri hesaplamalarına benzer şekilde korozyon hücresine ait devre hesapları da yapılabilir. Fakat Nernst Skalası'nda verilen değerler hidrojen elektrotu göre olup pratikte hidrojen elektrot kullanılmaz. Bunun yerine Çizelge 2.4'deki referans elektrotlardan birisi kullanılır. Pratikte su ve zemin içerisindeki elektrot potansiyeli için Hg₂Cl₂ (Kalomel) veya doymuş Cu/CuSO₄ (Bakır / Bakır sülfat) referans elektrotu kullanılır. Bu elektrotların standart hidrojen elektroduna göre ölçülen elektrot potansiyelleri [7];

- Hg₂Cl₂ (Kalomel) elektrot = +0,280 V
- Cu/CuSO₄ (Bakır / Bakır sülfat) elektrot = +0,316 V

Katodik olarak bir metal yapıyı korumak için Çizelge 2.4'de belirtilen referans elektrotların karşısındaki koruma potansiyel değerlerini sağlamak gerekir.

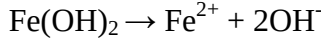
Çizelge 2.4 Referans elektroda göre koruma potansiyelleri

Referans Elektrot	Koruma Potansiyeli (mili Volt)
Doygun kalomel elektrot (Hg ₂ Cl ₂)	-780
Gümüş-Gümüş Klorid (Ag/AgCl)	-810
Bakır-Bakır-Sülfat (Cu/CuSO ₄)	-850
Çinko (Zn)	+250

Örnek 2.3

25 °C’de pH değeri 9 olan bir zemin içinde bulunan demir-çelik yapıların korozyon ürünü olan pasın ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) çözünürlük çarpımı $K_{\text{Ç}} = 1,8 \cdot 10^{-15}$ olduğuna göre korozyon hücresinin potansiyelini doymuş Bakır / Bakır sülfat referans elektroduna göre hesaplayalım.

Korozyon neticesinde demir yüzeyi hidroksit çökeltisi ile kaplı durumdadır. Önce demir ile denge halindeki $[\text{Fe}^{2+}]$ derişimini bulalım.



$$K_{\text{Ç}} = [\text{Fe}^{2+}] \cdot [\text{OH}^-]^2$$

$$\text{pH} = 9 \text{ ve } \text{pOH} = 14 - 9 = 5$$

$$K_{\text{Ç}} = 1,8 \cdot 10^{-15} = [\text{Fe}^{2+}] \cdot (10^{-5})^2$$

$$[\text{Fe}^{2+}] = 1,8 \cdot 10^{-5}$$

Eşitlik 2.1 kullanılarak korozyon hücresinin potansiyelini bulabiliriz.

Demir için $E^0 =$ Çizelge 2.3’den $-440 \text{ mV} = -0,44 \text{ V}$ olarak bulunur.

$$E = -0,44 - \frac{0,0592 \times (273 + 25)}{2 \times (298)} \times \log \left(\frac{1}{[1,8 \times 10^{-5}]^1} \right) \text{ Volt}$$

$$E = -0,58 \text{ Volt olarak bulunur.}$$

Bu değer hidrojen elektroduna göre olup doymuş bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre potansiyeli hesaplayalım.

$$E = -0,58 - 0,316 = -0,896 \text{ Volt olarak bulunur.}$$

Çeşitli metal ve alaşımların doymuş Cu/CuSO_4 referans elektroduna göre nötral zemin içerisinde ölçülen potansiyel değerleri Çizelge 2.5’de görülmektedir [16]. Zemin içinde farklı metallerin teması sonucu oluşan galvanik hücre elektromotor kuvveti Çizelge 2.5’de verilen potansiyel değerleri göz önüne alınarak değerlendirilmeli ve buna göre anot-katot belirlenmelidir.

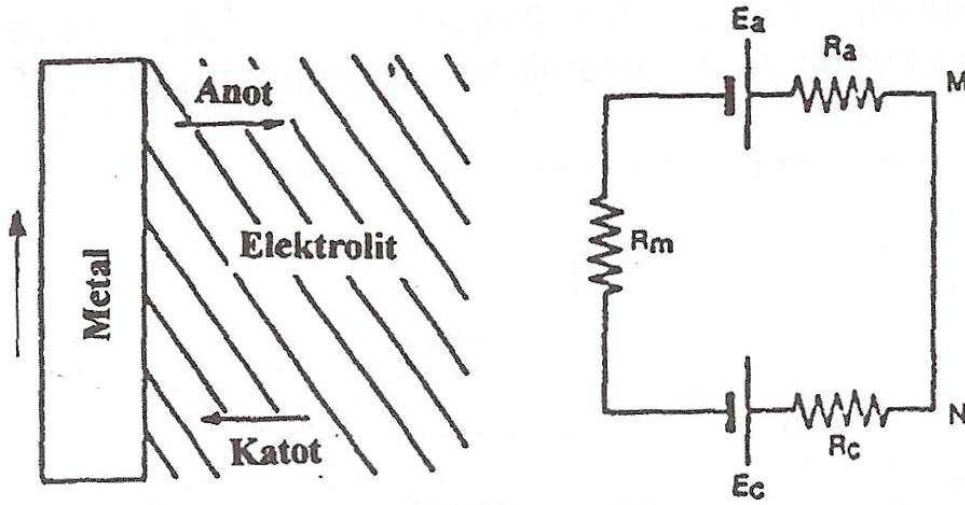
Çizelge 2.5 Çeşitli metal ve alaşımların Cu/CuSO₄ elektroduna göre potansiyelleri

Metal veya Alaşım	Elektrot Potansiyeli (mV)
Magnezyum (HP)	- 1750
Magnezyum (AZ63)	- 1550
Çinko	- 1100
Alüminyum (%5 Zn)	-1050
Alüminyum (Saf)	-800
Dökme Demir	- 680
Yumuşak Çelik	- 680
Paslanmaz Çelik (430, aktif)	- 640
Paslanmaz Çelik (304, aktif)	- 600
Paslanmaz Çelik (410, aktif)	- 590
Pirinç, Bakır	- 430
Bronz	- 380
Paslanmaz Çelik (430, pasif)	- 290
Nikel	- 270
Paslanmaz Çelik (410, pasif)	- 220
Titanyum	- 220
Gümüş	- 200
Paslanmaz Çelik (304, pasif)	- 150
Hastelley, Monel	-150
Paslanmaz Çelik (316, pasif)	- 120
Karbon, Grafit, Kok	+ 300

2.3.2 Korozyon Hücresi ve Akımı

Sadece sulu ortamdaki metallerin yüzeyinde değil, atmosfere maruz kalan ya da toprak altında bulunan metallerin yüzeyinde de su veya değişik kalınlıkta su filmi bulunur. Hava ve onun bir bileşeni olan oksijen gazı, atmosferle temas eden her çeşit su içerisinde belirli oranlarda çözünür. Su içinde çözünen oksijen gazı metal yüzeyinde redüklenerek, yani elektron alarak iyonik hale dönmeye meyleder. Eğer redüksiyon için gerekli elektronlar metal tarafından sağlanırsa, elektronlarını oksijene vererek oksitlenen metalin atomları sulu iyon, haline geçer ve böylece metal kimyasal değişime uğrar.

Korozyonun meydana gelebilmesi için, korozyon hücresi çevriminin kesintisiz çalışması gerekir. Yani anottaki kimyasal değişim sonucunda meydana gelen metal iyonlarının çözeltiye geçmesi sırasında açığa çıkan elektronlar, elektronik iletken vasıtasıyla katoda taşınırlar. İyonların sulu çözelti içerisindeki hareketi sayesinde anot ile katot arasında elektrik akımı meydana gelir. Pozitif yüklü iyonlar katoda, negatif yüklü iyonlarda anoda giderler ve böylece korozyon hücresi çevrimi tamamlanmış olur.

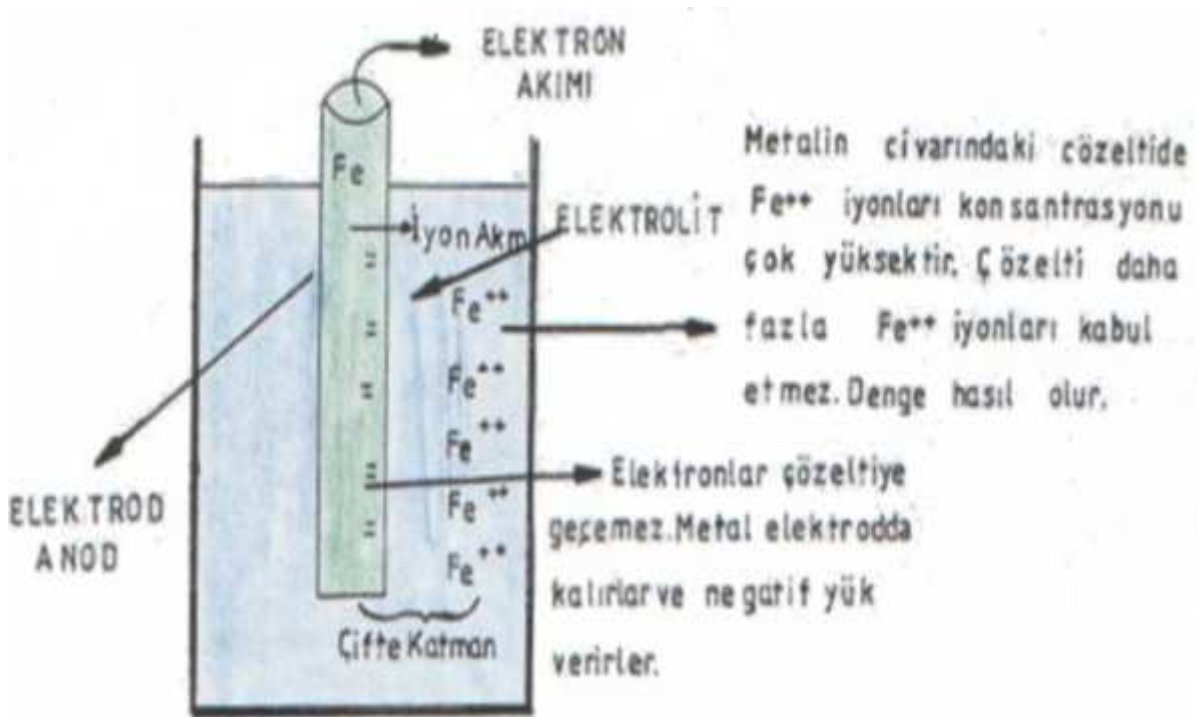


Şekil 2.12 Korozyon hücresinin devre şeması [11]

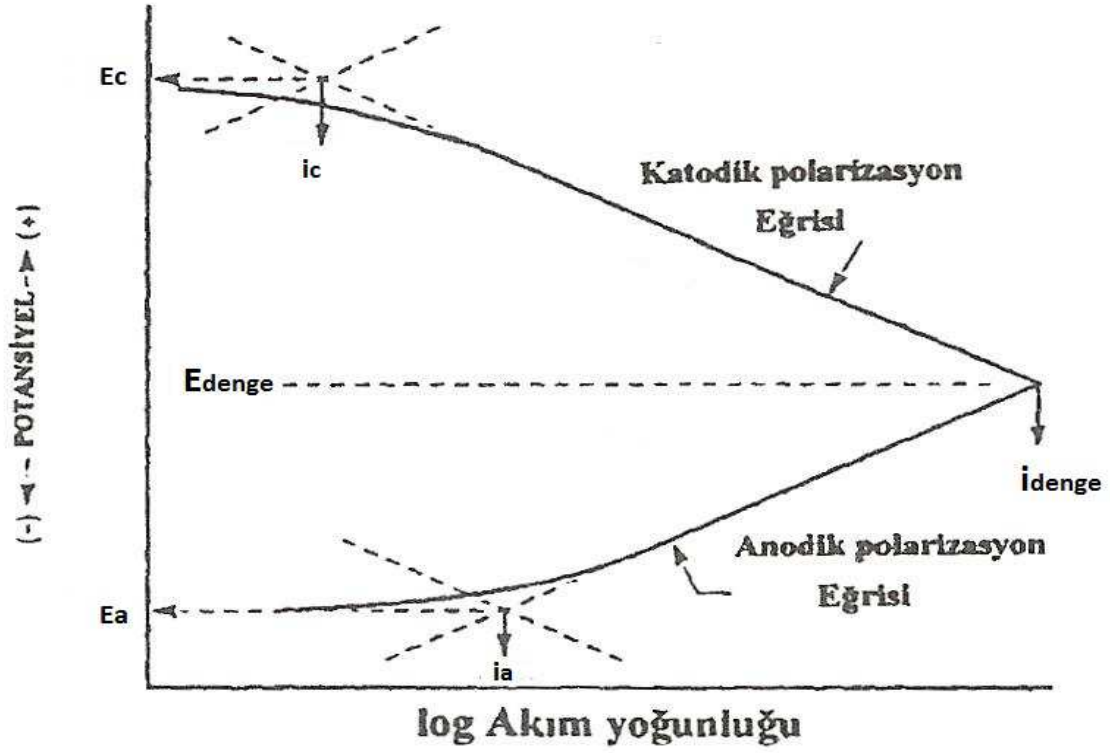
Korozyon hücresinin akımı Ohm Yasası'na göre (2.3) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$i_k = \frac{E_a - E_c}{R_m + R_a + R_c} \text{ Amper} \quad (2.3)$$

- Korozyonun başlaması ile yani anot ile katot birbirine bağlandıktan sonra hücreden geçen akımın etkisi ile bir denge potansiyeli (E_{denge}) meydana gelir. Oluşan bu denge gerilimi korozyon hücresinin korozyon potansiyeli (E_{cor}) olarak da adlandırılabilir. Katot ve anot arasındaki iyon alış veriş bu denge durumuna kadar devam eder (Şekil 2.13 ve Şekil 2.14).



Şekil 2.13 Metalin elektrolit içerisinde iyonlaşması ve denge durumu



Şekil 2.14 Korozyon hücresinde denge durumu

İyonik çözelti içerisinde katot ile anot arasında meydana gelen korozyon metal malzemenin miktarında azalmalara yol açar. Bu azalma miktarını Faraday Elektroliz Kanunu ile hesaplamak mümkündür [4].

$$m = \frac{A \times I \times t}{n \times F} \quad (2.4)$$

- m: Serbest hale gelen metal kütlesi (gr/m²)
- A: Metalin atomik kütlesi (Demir atomu için 56)
- I: Akım Yoğunluğu (A/m²)
- t: Zaman (sn)
- n: Değerlik sayısı
- F: Faraday sabiti (96500 Coulomb / eşdeğer gr)

Bu formül ışığında yapılacak olan hesaplamada 1 amperlik korozyon akımıyla yaklaşık olarak 9 kg çelik iyonlaşır [4].

2.3.3 Korozyon Hız Birimleri

Metallerin korozyon hızları prensip olarak iki ayrı şekilde ifade edilir:

- Birim zamanda, birim yüzeyde meydana gelen kütle kaybı
- Birim zamanda metal yüzeyinde meydana gelen kalınlık azalması

Korozyon hızı aşağıdaki birimlerle ifade edilir:

Korozyon Penetrasyonu: Korozyon sonucu metal kalınlığında bir yılda meydana gelen azalma, mm/yıl (MPY)

Ağırlık Kaybı: Korozyon sonucu metal yüzeyinin 1 m²'sinde 1 günde meydana gelen ağırlık kaybı, g/m² gün (GMD)

Korozyon Akım Yoğunluğu: Metal yüzeyinin 1 cm² deki anodik akım yoğunluğu, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

Demir metali söz konusu olduğunda bu birimlerin karşılıklı eşdeğerleri şöyledir:

$$1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 0,0116 \text{ mm/yıl} = 0,25 \text{ g/m}^2 \text{ gün} \quad (2.5)$$

Çizelge 2.6 Değişik korozyon hızlarının birbirine dönüştürme faktörleri [13]

Bilinen Korozyon Hızı	Çarpılacak Katsayı	Elde Edilecek Korozyon Hızı
MDD (mg/dm ² .gün)	10	GMD (g/m ² .gün)
MDD (mg/dm ² .gün)	0,03652/d	MPY (mm/yıl)
GMY (g/m ² .yıl)	0,0274	MDD (mg/dm ² .gün)
İPY (inç/yıl)	694,4.d	MDD (mg/dm ² .gün)
PYF (pound/ft ² .yıl)	133,8	MDD (mg/dm ² .gün)
Korozyon akım yoğunluğu	8,95.M _A /n	GMD (g/m ² .gün)
n = Söz konusu metalin değerliği		
d = Söz konusu metalin yoğunluğu (g/cm ³)		
M _A = Söz konusu metalin atom kütlesi		

Homojen korozyon hızını (2.6) eşitliği ile hesaplamak mümkündür [4].

$$R = \frac{k \times W}{A \times t \times d} \quad (2.6)$$

Bu eşitlikteki semboller şu durumları ifade eder:

- R: Korozyon hızı (mm/yıl)
- k: Sabit sayı (korozyon hızı birimine bağlı)
- W: Ağırlık kaybı (gr)
- A: Yüzey alanı (cm²)
- t: Zaman (yıl)
- d: Yoğunluk (gr/cm³)

Bir malzemenin korozyona karşı ne derece dayanıklı olduğunu eşitlik (2.6) ile hesaplanan korozyon hızına göre ifade etmek mümkündür.

Çizelge 2.7 Korozyon hızına göre malzemenin dayanıklılık durumu

Korozyon Hızı (R) (mm/yıl)	Malzemenin Korozyona Dayanıklılık Durumu
R<0,15	Dayanıklı
0,15<R<1,5	Orta Derece Dayanıklı
1,5<R	Dayanıksız

Örnek 2.4

Demir metali için 1 µA/cm² akım yoğunluğuna karşılık gelen korozyon hızını GMD, MDD ve mm/yıl olarak hesaplayalım.

Kütle kaybına dayanan korozyon hızları 2.4 eşitliği ile hesaplayabiliriz.

$$m = \frac{A \times I \times t}{n \times F}$$

Buradaki akım yoğunluğunu A/m^2 olarak kullanmak gerekir.

$$1 \mu A/cm^2 = \frac{1 A}{10^6 \mu A} \times \frac{10^4 cm^2}{1 m^2} = 0,01 A/m^2$$

$$m = \frac{56 \times 0,01 \times 86400}{2 \times 96500} = 0,25 g/m^2.gün$$

$$1 \mu A/cm^2 = 0,25 GMD$$

GMD değerinden MDD'ye aşağıdaki gibi geçebiliriz.

$$1 \mu A/cm^2 = 0,25 \times \frac{1000 mg}{1 g} \times \frac{1 m^2}{100 dm^2} = 2,5 mg/dm^2.gün = 2,5 MDD$$

$1 \mu A/cm^2$ korozyon hızının mm/yıl olarak eşdeğerini şöyle hesaplayabiliriz.

$$1 \mu A/cm^2 = 2,5 \times \frac{1 g}{1000 mg} \times \frac{1 dm^2}{100 cm^2} \times \frac{365 gün}{1 yıl} = 0,009125 g/cm^2.yıl$$

Demirin yoğunluğu $d = 7,84 g/cm^3$ alınır.

$$1 \mu A/cm^2 = \frac{0,009125 g/cm^2.yıl}{7,84 g/cm^3} = 0,0116 mm/yıl$$

Örnek 2.5

Bir tuz çözeltisinin içindeki demirin korozyon hızı $0,2 mm/yıl$ olarak ölçülmüştür. Buna göre korozyon hızını GMD ve $\mu A/cm^2$ cinsinden hesaplayalım.

$$1 m^2 \text{ yüzeyde } 1 \text{ yılda ayrılan demir hacmi} = 1 \times 0,2 \times 10^{-3} m^3 = 200 cm^3$$

$$m = V \times d \text{ gr} \quad (2.7)$$

$1 m^2$ yüzeyde 1 yılda korozyona uğrayan demirin kütlesini 2.7 eşitliği ile hesaplayalım.

$$m = 200 \times 7,84 = 1568 \text{ gr}$$

$1 m^2$ yüzeyde 1 günde korozyona uğrayan demir kütlesi,

$$m = 1568/365 = 4,3 g/m^2.gün = 4,3 GMD$$

$1 m^2$ yüzeyde alanında oluşan korozyon hızını $\mu A/cm^2$ cinsinden hesaplayalım.

$$4,3 = \frac{56 \times I \times 86400}{2 \times 96500} \text{ g/m}^2 \cdot \text{gün}$$

$$I = 0,172 \text{ A/m}^2 = 0,172 \times 10^6 / 10^4 = 17,2 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$$

Örnek 2.6

2 g/m².gün korozyon hızı ile korozyona uğrayan deniz suyu içerisindeki bir çelik kazık için katodik koruma akım ihtiyacının hesaplayalım.

Eşitlik (2.4) kullanılarak 1 m² yüzey alanındaki korozyon için akım yoğunluğunu hesaplayabiliriz.

$$2 = \frac{56 \times I \times 86400}{2 \times 96500} \text{ g/m}^2 \cdot \text{gün}$$

$$I = 0,08 \text{ A/m}^2 = 80 \text{ mA/m}^2$$

Örnek 2.7

Korozyon hızı 6 GMD olan bir çelik plakada çukur korozyonu mevcut olup çukurlaşma faktörü $f_{\text{çukur}} = 9,7$ olduğuna göre 1 yılda korozyon sonucu oluşacak maksimum çukurlaşma derinliğini hesaplayalım.

1 m² yüzeyde 1 yılda korozyon sonucu meydana gelen kütle kaybı,

$$m = 6 \times 365 = 2190 \text{ g/m}^2 \cdot \text{yıl}$$

1 m² yüzeyde 1 yılda korozyon sonucu azalan demir hacmi,

$$V = 2190 / 7,84 = 279,34 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{yıl} = 279,34 / 1000 = 0,27934 \text{ mm/yıl}$$

Maksimum çukurlaşma derinliğini eşitlik 2.8 ile hesaplayabiliriz.

$$P = f_{\text{çukur}} \times V \tag{2.8}$$

$$P = 9,7 \times 0,27934 = 2,71 \text{ mm/yıl olarak bulunur.}$$

Örnek 2.8

0,33 m² yüzey alanı olan bakır tel 0,06 m² yüzey alanı olan tel ile bağlanıp deniz suyu içine daldırılmıştır. Demirin söz konusu deniz suyu içinde yalnız başına bulunduğu zaman korozyon hızı 0,13 mm/yıl olduğuna göre bu tellerin ikisini birlikte katodik korumak için gerekli akım şiddetini bulalım.

Nernst Skalası dikkate alındığı zaman demirin bakırdan daha aktif bir metal olduğu görülecektir. Bu yüzden demir anot, bakır katot olacaktır. Bu iki elektrot arasında anot akım yoğunluğu kadar bir akım geçer [5].

Demirin korozyon hızını A/cm² cinsinden bulalım.

$$\text{Korozyon hızı} = 0,13 \text{ mm/yıl} = 0,013 \text{ cm/yıl}$$

$$\text{Korozyon hızı} = 0,013 \text{ cm/yıl} \times 7,84 \text{ g/cm}^3 = 0,102 \text{ g/cm}^2.\text{yıl}$$

$$\text{Korozyon hızı} = 0,102/365 = 2,792 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2.\text{gün}$$

$$\text{Korozyon hızı} = 2,792 \times 10^{-4} \times 10^4 = 2,792 \text{ g/m}^2.\text{gün}$$

Eşitlik (2.4) kullanılarak 1 m² yüzey alanındaki korozyon için akım yoğunluğunu hesaplayabiliriz.

$$2,792 = \frac{56 \times I \times 86400}{2 \times 96500} \text{ g/m}^2.\text{gün}$$

$$I = 0,111 \text{ A/m}^2$$

$$\text{Korunacak toplam yüzey alanı} = 0,33 + 0,06 = 0,39 \text{ m}^2$$

Katodik koruma için toplam akım ihtiyacı,

$$i = 0,111 \times 0,39 = 0,043 \text{ A olarak bulunur.}$$

2.4 Korozyon Tipleri

Bu bölümde sık görülen korozyon tipleri incelenmiştir [13].

Sık kullanılan metal ve alaşımlarda görülen bazı korozyon tipleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8 Metal/alaşım tipleri ve korozyona yatkınlıkları [13]

Metal/Alaşım	Korozyon Tipi	Korozyon Ürününün Görünümü
Magnezyum	Çukur korozyonu	Beyaz toz halinde küme, yüzeyde lekelenme
Demir-Çelik Alaşımı	Çukur korozyonu Yüzey korozyonu Taneler arası korozyon	Kırmızımsı-kahverengi pas
Alüminyum	Çukur korozyonu Pullanma korozyonu Gerilmeli korozyonu Taneler arası korozyon	Beyaz-gri toz halinde küme
Bakır ve Alaşımları	Yüzey korozyonu Taneler arası korozyon	Mavi ya da mavi-yeşil kalıntı
Kadmiyum	Yüzey korozyonu	Beyaz toz ya da kahve-siyah benekler
Paslanmaz Çelik	Çukur korozyonu Çatlak korozyonu Yüzey korozyonu Taneler arası korozyon	Yüzeyde pürüz, kırmızı, kahve, siyah lekelenmeler
Titanyum	Yüksek korozyon dayanımı	700 °F üzeri sıcaklıklarda değişik renklerde oksitlenmeler
Nikel	Korozyon dayanımı mükemmel Nemli ortamlarda çukur korozyonu	Yeşil toz kalıntısı
Krom	Çukur Korozyonu	Görünen korozyon ürünü olmayıp kaplamada kalkma ve kabarma

2.4.1 Yüzeysel Korozyon

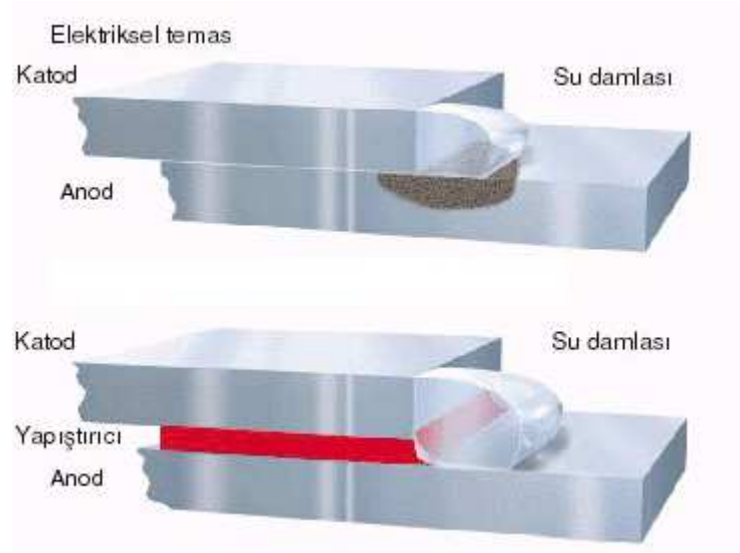
Sıvılarda veya kirli ortamda, metal yüzeylerinde kimyasal bir etki ile atmosferik şartlarda oluşan korozyonun en basit şeklidir. Metalin yüzeyinde bir renk değişimine neden olur. Genellikle metal yüzeylerinde matlaşma şeklinde kendini gösterir. Demirin paslanması, bakırın renginin matlaşması, nikel yüzeyinin sislenmesi, gümüşteki kararma bu tip korozyona örnek verilebilir. Bu tür korozyon, yüzeyde kaba ve dalgalı bir görünüş oluşturur. Parlatma ile yüzeydeki bu tür korozyon alınabilir.



Şekil 2.15 Gemi halatı bağlantı gemi

2.4.2 Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon, farklı metallerin ısı ve nem ortamında birbirlerine teması halinde meydana gelir. Örneğin, alüminyum alaşımlı bir malzemenin üzerine arada herhangi bir yalıtım malzemesi kullanmadan paslanmaz çelik veya titanyum malzeme monte edildiğinde zamanla alüminyum malzemenin üzerinde korozyon meydana gelecektir. Bu galvanik korozyondur. Galvanik korozyona meydan vermemek ve iki farklı metal arasında elektron transferini önlemek için ipek bant, amiyant, sealink (macun) gibi izolasyon malzemeleri kullanmak gerekir.



Şekil 2.16 Galvanik korozyonun oluşumu ve önlenmesi

Sık rastlanan galvanik çiftler Çizelge 2.9’da listelenmiştir [17].

Çizelge 2.9 Sık rastlanan galvanik çiftlerin korozyon davranışları

Galvanik Çift	Korozyona Uğrayan Metal
Çelik ve Bakır	Çelik
Çıplak ve Bitüm Kaplı Çelik	Çıplak Çelik
Çelik ve Kurşun	Çelik
Çıplak ve Galvanizli Çelik	Galvanizli Çelik
Çelik ve Alüminyum	Alüminyum
Yeni ve Eski Boru	Yeni Boru

2.4.3 Taneler Arası Korozyon

Tane sınırları boyunca oluşan korozyonlara taneler arası korozyon denir. Taneler arasındaki metal bileşimi tane içine göre farklıdır. Alaşım elemanları, çökeltileri, tane sınırlarına yerleşir. Hatalı ısıl işlem tane sınırlarını hasarlar ve onları tane içine göre daha anodik yapar. Taneler arası korozyon, gözle tespit edilemediğinden en tehlikeli korozyon türüdür.



Şekil 2.17 Taneler arası korozyon

Taneler arası korozyon, taneler arası sınır çizgilerinde meydana gelir. Bu bölgelerde metallere göre daha düşük derişimde bulunur. Bu nedenle sınır çizgileri korozyon için uygun bir ortam oluşturur. Paslanmaz çelikte kaynak yapılan bölgede bu tip taneler arası korozyon olayı meydana gelir.

2.4.4 Pullanma Korozyonu

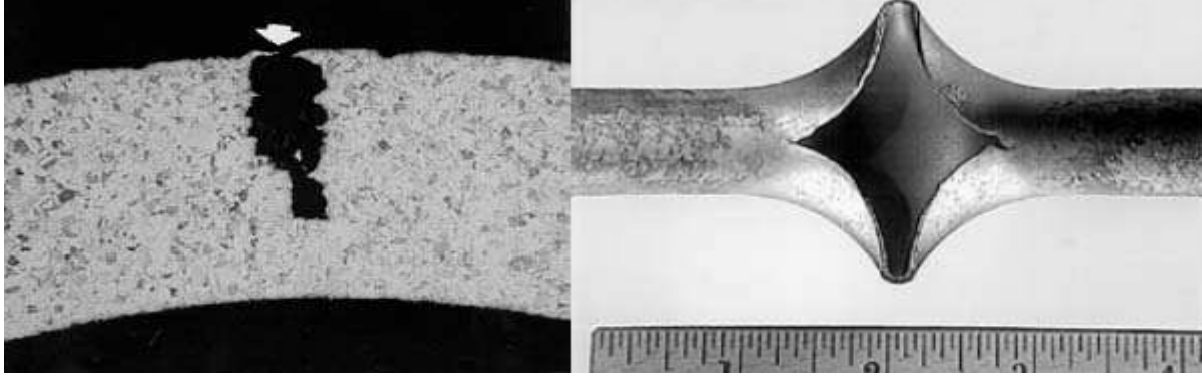
Pullanma korozyonu, taneler arası korozyonun ilerlemiş şeklidir. Burada hemen yüzeyin altına tane sınırları altında ilerleyen taneler arası korozyonun genişleyen ürünü, yüzeydeki metali pul pul kaldırır. Genellikle haddelenmiş veya kalıptan çekilmiş parçalarda, kabarma ve pul pul olma şeklinde kendini gösterir.



Şekil 2.18 Alüminyum gövde kirişi üzerinde pullanma korozyonu

2.4.5 Çatlak Korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan bir çatlak içinde veya dar bir aralıkta oluşan korozyon çeşididir. Bu korozyonun temel nedeni, çatlak içi ile çevre elektrolit arasında oksijen derişimi veya metal iyonu derişiminin farklı oluşudur. Çatlağın dış kısımları katot olacağından bu bölgede korozyon görülmez.



Şekil 2.19 Çatlak korozyonunun oluşumu ve çatlak

2.4.6 Çukur Korozyonu

Korozyonun çok dar bölgeler üzerinde yoğunlaşması sonucu derin ve dar çukurlar şeklinde meydana gelen korozyona çukur korozyonu denir. Bu çukurların derinliği, yaklaşık olarak çapı büyüklüğündedir. Çukurların ağız bölgeleri genellikle korozyon ürünleri ile doludur. Metal yüzeyinde karıncalanma görünümünde, tehlikeli bir bölgesel hasar oluşturur. Korozyonun sebep olduğu malzeme kaybı diğer homojen korozyonlara göre daha az olmasına karşın parçalar kısa sürede delinerek kullanılmaz hale gelirler. Bu açıdan en tehlikeli korozyon çeşididir.



Şekil 2.20 Çukur korozyonu

Çukur korozyonu, alüminyum ve magnezyum alaşımlarında sık rastlanan bir tür korozyondur. İlk belirtisi yüzeyde toplanan ve kabaran beyaz ve gri tozumsu yığıntılardır. Bu yığıntılar temizlendikten sonra küçük oyuklar veya boşluklar görülebilir.

2.4.7 Seçimli Korozyon

Bir alaşım içinde bulunan metallere birinin diğerinden önce korozyona uğramış halidir. %70 Cu + %30 Zn'den oluşan pirinç içinde bulunan Zn kolayca korozyona uğrayabilir. Korozyon sonucu, alaşım yüzeyindeki Zn derişimi azalır ve normal sarı renk, bakır kırmızısına dönüşür. Çok sık rastlanan bu seçimli korozyon olayına 'çinko azalması' adı verilir.

2.4.8 Erozyon Korozyonu

Özellikle boru sistemlerinde ve limanlarda sık rastlanan bu tür korozyonda metal ile korozif ortam arasındaki bağıl hareket nedeniyle metalin aşınma hızı artar. Metal yüzeyinde delikler, oluklar ve hendekler oluşur. Su içinde hareket halindeki birçok yapıda kendini gösterir. Ortamda katı parçacıkların varlığı korozyon hızını daha da artırır.



Şekil 2.21 Borunun dış ve iç görünümü ile erozyon korozyonu

2.4.9 Biyolojik Korozyon

Bazı topraklarda metalleri kimyasal veya elektrokimyasal olarak etkileyen bakteri ve mikroplar bulunabilir. Bu durum, dökme demirde fark edilen ve genellikle grafitlenme olayı ile açıklanan hızlı korozyonun da başlıca sebeplerindendir. Bakteriler içerisinde en tehlikeli olanı, sülfat indirgeyen bakterilerdir. Bu bakteriler, topraktaki sülfatları indirgeyerek, demir alaşımlarını çok çabuk etkilediği bilinen hidrojen sülfürü (H_2S) serbest hale geçirirler.

2.4.10 Kaplama Bozukluğu Korozyonu

Kaplama yapılmış bir metalin potansiyeli ile kaplamasız metalin potansiyeli birbirinden farklıdır. İşçilik hatalar nedeniyle kaplamanın bazı bölgelerinin bozulması veya delinmesi halinde bu bölgeler anot olacaktır ve korozyona uğrayacaktır. Bu tip korozyon metal yüzeyinde çok küçük bölgelerde yoğunlaşan bir korozyondur.



Şekil 2.22 Kaplama bozukluğunun neden olduğu korozyon

2.4.11 Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyon, taneler arası korozyonun özel bir çeşididir. Bu korozyon, metal çekme gerilimi ile karşılaştığında korozif ortamda oluşur. Bağlayıcılara ısıtma işlemi veya pres işlemlerinden sonra uygun olmayan şekilde su ile soğutma yapıldığında gerilmeli korozyon oluşur.

Gerilmeli korozyon sadece çekme gerilmeleri sonucu olur. Bazı ısıtma işlemli alüminyum alaşımlarında bu tip korozyonu önlemenin tek yolu püskürtmeli sertleştirme yüzeyi ile sıkıştırma stresli bir yüzey oluşturmaktır.

Gerilmeli korozyon uçaklarda perçinli birleştirmelerde, perçinler arasındaki gerilmiş yüzeylerde görülür. Korozyonu tespit etmek için yüzeye dikkatlice bakmak yeterlidir.



Şekil 2.23 Gerilmeli korozyon

2.4.12 Yorulma Korozyonu

Yorulma korozyonu, gerilmeli korozyon çatlaklarına benzer şekilde, dinamik yükler ve metaldeki korozyonun etkisiyle oluşan çatlamlardır. Korozyif ortam olan ve dinamik yüklere maruz kalan tüm metallerde bu tür çatlamlar oluşur. Yorulma korozyonu iki aşamada olur. Birinci aşamada korozyif ortamın ve dinamik yüklerin etkisi ile metal yüzeyinde korozyon oyucu ve çatlak oluşur. Çatlak oluştuğundan sonra korozyif ortamın etkisi ortadan kalksa bile dinamik yükün etkisi ile çatlak ilerlemesi devam eder. Korozyif etkiyi ortadan kaldırmak için korozyif ortamın metalle teması kesilmelidir

2.4.13 Kaviteasyon Korozyonu

Kaviteasyon korozyonu hızla akan sıvıların malzeme yüzeyine yakın bölümlerinde oluşan alçak basınç kabarcıklarının büyümesi ve patlaması ile meydana gelir. Oluşan şok dalgaları yüzeye çarparak malzeme yüzeyini örten tabakayı tahrip ederler. Açığa çıkan metal çözünerek korozyona uğrar. Bu tür korozyona uğrayan yüzeylerin görünümü kaba ve deliklidir, oyuklar sıktır, yüzeyde petek görünümü meydana gelir.



Şekil 2.24 Kaviteasyon korozyonu

2.4.14 Bıçak Çizgisi Korozyonu

Stabilize edilmiş paslanmaz çelikler, (Titanyumlu ve Niyobyumlu çelikler) 1100 °C' a kadar ısıtıldığı zaman (genellikle kaynak sırasında) Titanyum ve Niyobyum karbürler çözünür. Hızla soğutulduğunda çözelti içinde kalırlar. Daha sonra metal krom karbür çökelme sıcaklığına ısıtılınca Titanyum ve Niyobyum karbür oluşturamaz ve alaşım sanki stabil olmamış gibi davranır. Korozyon hasarı kaynağa komşu çok dar bir bölgede meydana gelir.

2.4.15 Aralık Korozyonu

Perçin, cıvata, conta gibi altı örtülü yüzeylerde ve aralıklarda meydana gelen önemli bir korozyondur. Aralık korozyonunun meydana gelmesi için aralığın çözeltinin girebileceği kadar geniş, aynı zamanda çözeltinin çıkamayacağı kadar dar olmalıdır. Sistemin mekanizması; aralık içinde bulunan sözü geçen çözelti durgun olduğu için gerekli oksijen kısa sürede tükenir. Böylece aralığın içi ve dışı arasındaki oksijen iyonu derişimi farkı aralık korozyonuna neden olur.



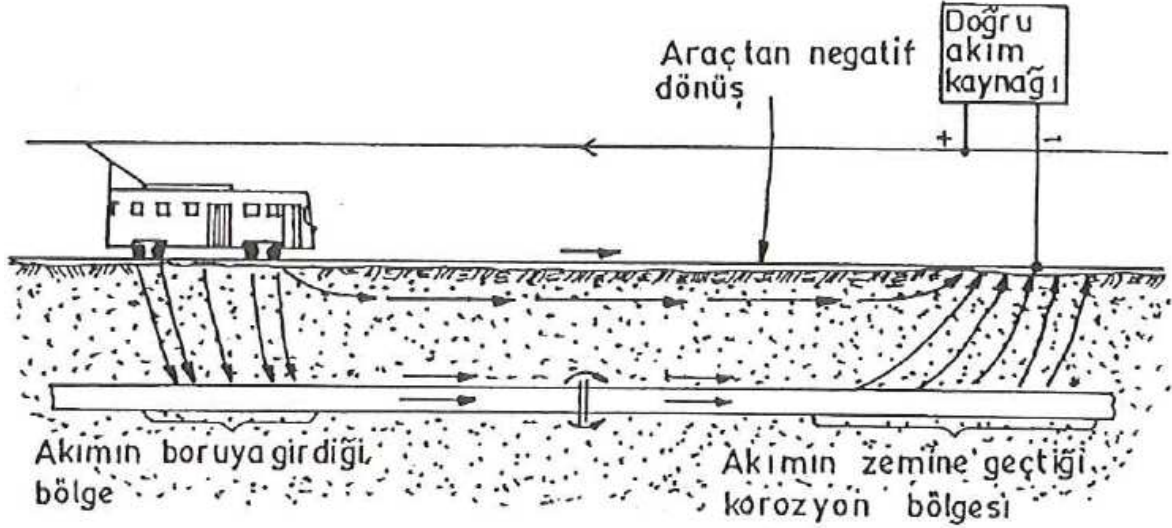
Şekil 2.25 Farklı görünümelerde aralık korozyonları

2.4.16 Kaçak Akım Korozyonu

Toprak zemin içerisinde tren, tramvay ve metro gibi raylı taşıtların kaçak akımı yer altı borularında çok şiddetli ve hızlı korozyona sebep olur. Hattın her noktasında toprağa doğru bir akım oluşur. Metal, Faraday Kanunu'na göre korozyona uğrar. Özellikle raylı sistem taşıtlarından yayılan kaçak akım negatif kutbun raya bağlandığı nokta civarında borudan tekrar raya döner ve korozyon riskini oluşturur. Başlıca kaçak akım kaynakları olarak DC raylı taşıma sistemleri, DC akımla çalışan kaynak makineleri, madencilik ekipmanları, yüksek gerilim DC taşıma sistemleri ve farklı yapılara ait dış akım kaynaklı katodik koruma

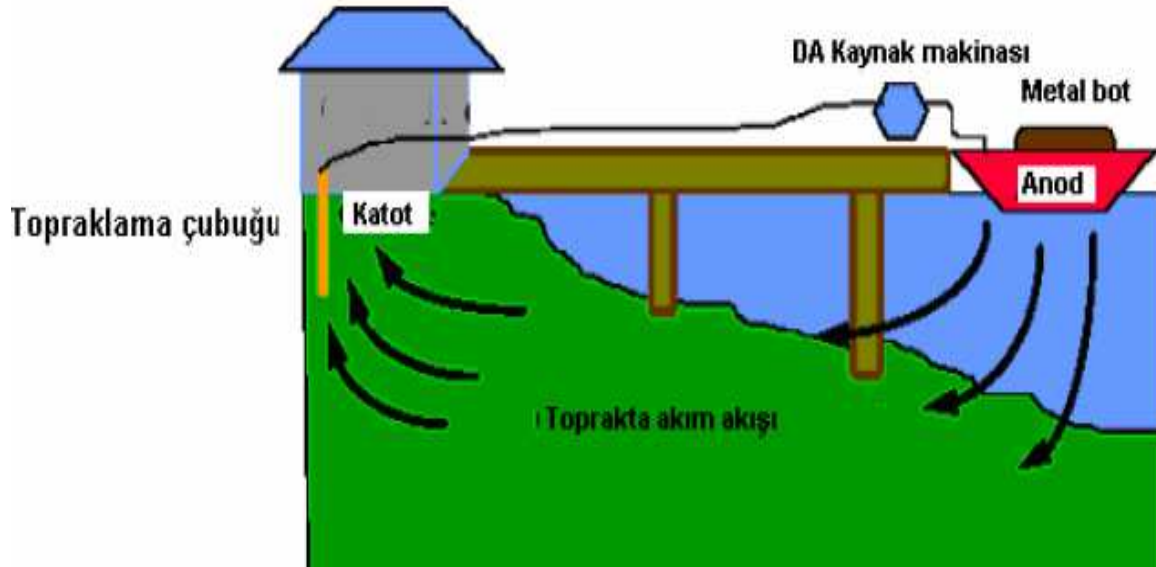
sistemleri sıralanabilir.

Elektrikli demir yolları, elektrikle çalışan raylı sistemler başlıca kaçak akım korozyonunun doğru akım kaynağıdır. Bu sistemlerde kaçak akımların etkisi 24 saattir [7].



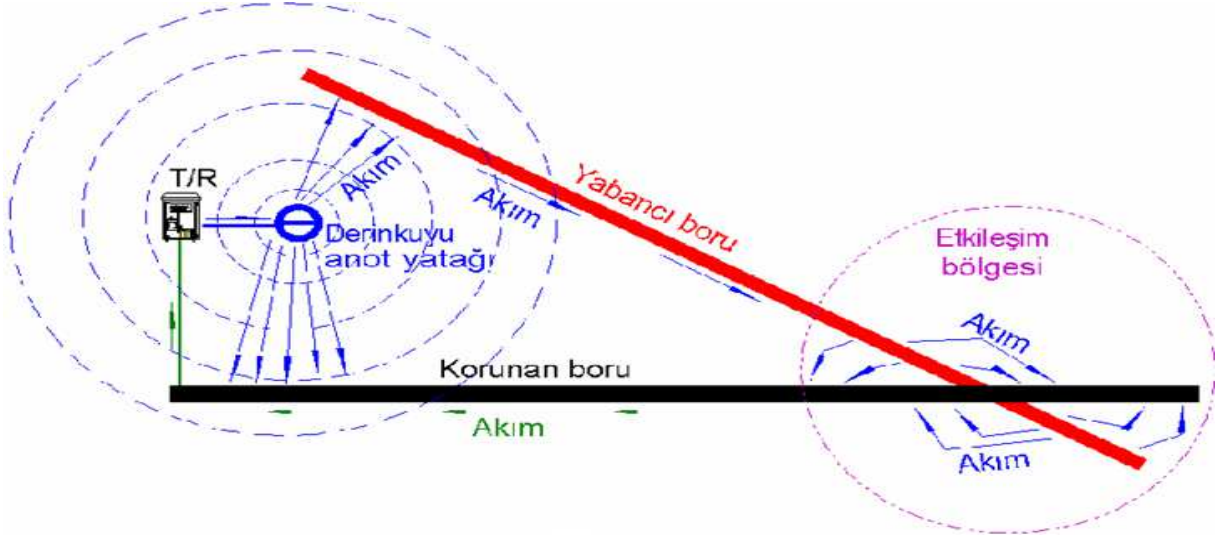
Şekil 2.26 Doğru akım taşıma sisteminin neden olduğu kaçak akım korozyonu

Doğru akım kaynak makineleri de kaçak akım korozyonuna neden olabilen doğru akım kaynaklarındandır. Şekil 2.27’de görüleceği üzere doğru akım hatlarının biri topraklama çubuğu üzerinden topraklanmıştır. Bu durumda metal olan bot anot olarak ve topraklama çubuğu ise katot olarak çalışır [7].



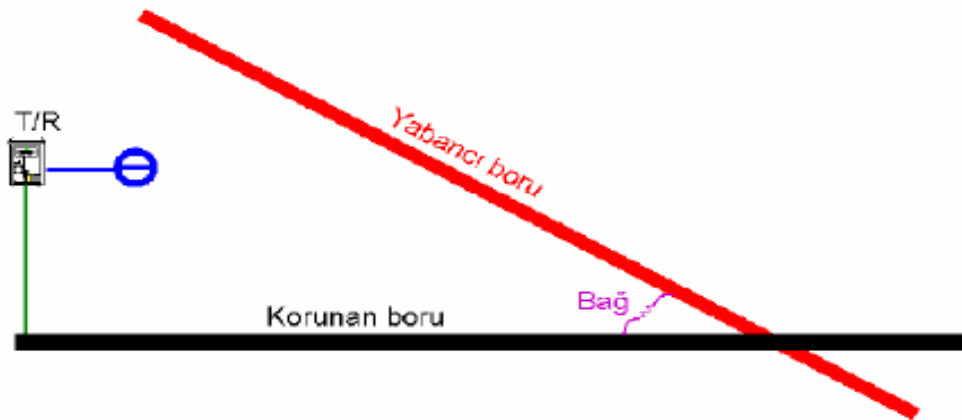
Şekil 2.27 Doğru akım kaynak işleminin neden olduğu kaçak akım korozyonu

Katodik koruma sistemleri metalik yapılar üzerinde kaçak akım korozyonunun kaynaklarından biridir. Bu elektrokimyasal korozyon hücresine örnek yabancı bir boru hattının korunmuş boru hattının anot yatağının yakınından geçip ve sonra boru hattını kesme durumudur.



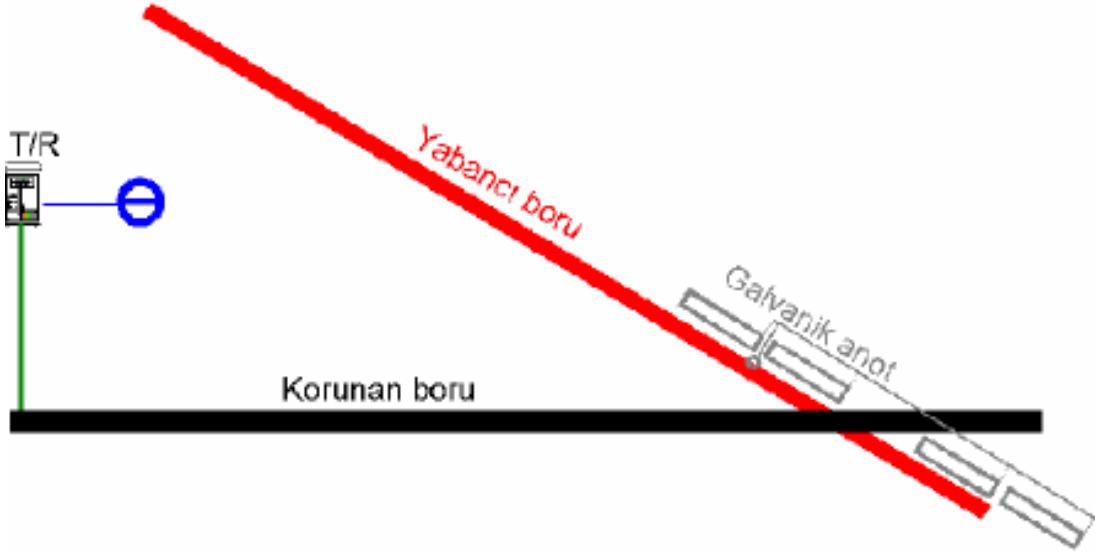
Şekil 2.28 Katodik koruma sisteminin yol açtığı korozyon

Katodik koruma sistemleri anot yatağının yerine, etkilenen borunun konumuna, katodik koruma sisteminin karakteristiğine bağlı olarak yakınındaki borularda kaçak akıma neden olabilir. Sıklıkla görülen etkileşim Şekil 2.28’de görülmektedir. Burada etkileyen boru korunan boru, etkilenen boru ise yabancı boru olarak adlandırılmıştır. Bu durumda iki boruyu birbirine bağlayarak tek metalik yapı gibi davranmalarını sağlayabilir. Potansiyelleri eşitlemek için bağlantı bir ayarlı direnç vasıtası ile tesis edilmelidir [18].



Şekil 2.29 Direkt bağlama yöntemi

Katodik koruma sisteminin neden olduğu kaçak akımı önlemenin bir başka yöntemi de etkilenen boruya galvanik anotlar bağlamaktır. Etkilenen boruya etkileşim alanı boyunca galvanik anot bağlanarak hem etkilenen borunun potansiyelini etkileyen boruya yaklaştırır hem de kaçak akımın toprağa dönmesi için düşük dirençli bir yol tesis edilir (Şekil 2.30). Anot sayısı, etkilenen boruya nerelerden bağlanacağı etkileşim bölgesinde yapılacak ölçümler neticesinde belli olur. Bu etkileşim bölgesinde kullanılacak olan anotların daha çabuk tükeneyeceği unutulmamalıdır. Etkileyen boruya dokunulmadığı için daha çok kabul gören bir yöntemdir [18].



Şekil 2.30 Etkilenen boruya galvanik anotlar bağlanması

Kaçak akım etkisini azaltmak için, katodik olarak korunmuş boru hattının anot yatağından yabancı boruya girecek olan elektronlar galvanizli bir şerit yardımıyla yabancı boruya paralel bir konumda toplanarak; elektronların yabancı boru yerine galvanizli şeritle oluşturulan metal kalkan üzerinde toplanması sağlanabilir [19]. Fakat kaçak akım etkisindeki bölgeye yine galvanik anot ilavesi gereklidir.

Kaçak akımın etkisini azaltmak için bir başka yöntem de kesişen boru hatlarından birinin kesişme noktasında çok özel bir kaplama ile kaplanmasıdır [19].

2.5 Korozyondan Korunma Yolları

Metal yapının bulunduğu çevredeki doğa şartlarını değiştirmek genelde mümkün olmadığından, korozyonu önleme ya da geciktirme yöntemleri ile korozyona engel olmak mümkündür. İlk olarak çevre şartlarına dayanıklı metalin seçimi yapılır; uygun bir sistem tasarımı yapılmalıdır. Daha sonra da metalin bir koruyucu ile kaplanması yani çevreye karşı yalıtımı yapılabilir veya kimyasal, elektrokimyasal yöntemlerle koruma yapılabilir.

2.5.1 Uygun Malzeme Seçimi

Korozyonu önlemenin en genel yolu kullanıldığı yere uygun metal ve alaşımların tercih edilmesidir. Bu tercihler yapılırken bazı kurallara uymak gerekir. Bu kurallar [20];

- Oksitleyici (yükseltgen) olmayan indirgeyici koşullarda örneğin havasız asitlerde ve sulu çözeltilerde çoğunlukla nikel bakır alaşımları kullanılmalıdır.
- Oksit koşullarda krom içeren alaşımlar kullanılmalıdır.
- Çok şiddetli oksitleyici koşullarda titanyum ve alaşımları kullanılmalıdır.

Alaşım elemanı olarak, korozyona dayanıklı, malzemeler kullanılıncı alaşımın özellikleri değiştiğinden, malzemenin korozyon dayanımı da artacaktır. Alaşımlama yaparak korunma ekonomik olarak pahalı bir yöntemdir. Çünkü korozyon yüzeyde meydana gelmesine rağmen alaşım oluşturabilmek için, alaşım elemanının malzemenin tüm yapısına eşit dağıtılması gerekir. Bu da korozyona dayanıklı elemanın yüksek oranda kullanılmasına sebep olur ve dolayısıyla maliyet artar. Paslanmaz çelikler bunun en güzel örneğidir. Çeliklere paslanmaması için katılan krom maliyeti artırır. Paslanmaz çelik ifadesi aslında yerinde kullanılmayan bir ifadedir. Paslanmaz çelikler aslında paslanmaz değildir ve ayrıca korozyona en dirençli malzeme de değildir. Paslanmaz çelikler, orta derecede oksitleyici korozyon ortamında (örneğin nitrik asit) yaygın olarak kullanılır. Fakat paslanmaz çelikler klorür içeren çözeltilere ve gerilme korozyonuna karşı olağan yapı çeliklerinden daha az dirençlidir. Bu nedenle, paslanmaz çeliklerin uygun olmadıkları uygulamalarda kullanılmamalarına büyük dikkat gösterilmelidir [20].

Bir alaşım seçerken, o alaşımın en ucuza mal olması ve korozyona karşı en dirençli olması istenir. Aşağıda hangi koroziif ortamlarda hangi malzemelerin kullanılabileceği özetlenmiştir.

Çizelge 2.10 Çeşitli korozi ortamlara göre kullanılabilir malzemeler [20]

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 korozyon dayanımı, yüzeylerinin homojenleştirilmesi, saflaştırılması ve pürüzsüzleştirilmesi gibi önlemlerle de iyileştirilebilir. Metallerin arılaştırılması da diğer bir yöntemdir. Genel olarak arı bir metalin korozyona karşı dayancı katışıkları ya da az miktarda diğer elementler içeren bir metalinkinden daha iyidir. Fakat arı metaller genellikle pahalı olup oldukça yumuşak ve zayıftır.

2.5.2 Uygun Sistem Tasarımı

Sistemler tasarlanırken korozyona sebebiyet verebilecek durumların göz önünde bulundurularak tedbirlerin alınması, korozyonu önleyici bir etkidir. Uygun sistem tasarımına bazı örnekler aşağıda sıralanmıştır:

- Boru hatlarında akışkan hızının yüksek olması kavşak bölgelerinde erozyon korozyonuna sebebiyet verdiğinden akışkan hızını kavşak bölgelerine yaklaşırken düşürücü tedbirler alınır.
- Otomobil benzin depoları tasarlanırken içerisinde hiçbir şekilde birikinti kalmayacak şekilde tasarlanır.

- Perçin, cıvata vb. elemanlar metale temas edeceği zaman ya çevresiyle bir izolasyon tedbiri alınmalı ya da galvanik çift oluşturmayacak malzemeler seçilmelidir.
- Kaynak yapılacak malzemelerde kaynak elektrotu olarak galvanik çift oluşturmayacak elektrotlar kullanılmalıdır.

Bölgesel korozyonu önlemek için, tasarım ve üretim aşamalarında uyulması gereken bazı kurallar [20]:

- Benzer olmayan metallerin direk teması engellenmelidir.
- Yarıklardan kaçınılmalıdır.
- Elektrikli makinelerden oluşan rastgele akımlar önlenmelidir.
- Bağlantılarda perçinden çok kaynak kullanılmalıdır. Perçinlenme ile yapılan bağlantılar aralık korozyonuna neden olabilir. Perçin kullanılması gerekli ise perçinlenen malzemeye göre katodik olan perçin seçilmelidir.
- Bir sistemin çabuk korozyona uğraması beklenen kısımları kolay değiştirilecek biçimde yapılmalıdır.
- Korozyon nedeniyle zamanla malzemenin kalınlığı azaldığından, tasarım aşamasında kalınlığın ne kadara düşebileceğini belirtmek gerekir. Genel olarak bir malzemenin istenen ömür için gerekli kalınlığın iki katı alınır.

2.5.3 Koruyucu Kaplama

Koruyucu kaplama basit tanımıyla; korunacak malzeme yüzeyi ile korozyona yol açan ortam ve maddeler arasında yalıtımın sağlanmasıdır [20].

Korozyondan korunmak için metalin koruyucu kaplamalar ile kaplanarak çevre-yapı arasında az veya çok yalıtkan bir engel oluşturmak daha ekonomik bir yoldur. Kaplamaların kalitesi elektriksel dirençleri ile ilgili olup, 10000 Ohm/mm^2 değerinden büyük dirençliler korozyon açısından uygundur [19].

2.5.3.1 Boyayla Koruma

Boyalar, metal yüzeyini çevreden yalıtarak su ve oksijenin metal yüzeyine ulaşmasını önleyen genellikle organik malzemelerdir. Boyaların bileşiminde korozyonu önleyici çeşitli pigmentler kullanılır. Boyalar, uygulama kolaylığı ve düşük maliyetleri nedeniyle korozyondan korumak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla çok sayıda boya cinsleri geliştirilmiştir. Bunların kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri birbirinden farklı olmakla beraber, hepsinde ortak olan, sağlam ve geçirimsiz bir kabuk oluşturarak metalin çevresi ile temasını önlemektir. Boyalar korozyonu önleme görevini üç şekilde yerine getirir:

- Bütün boyalar, metal yüzeyi ile çevre arasında geçirimsiz bir tabaka oluşturarak metalin çevresi ile reaksiyona girmesini önler.
- Bazı boyalar içinde inhibitör etkisi yapan pigmentler bulunur. Bunlar metal yüzeyinin pasifleşmesine neden olurlar.
- Bazı boyalar içinde dolgu maddesi olarak çinko tozu bulunur. Çinko galvanik etki yaparak metali katodik olarak korur. En şiddetli korozyon ortamında 15–20 yıl dayanabilen epoksi, poliüretan, çinko tozlu vb. çift bileşenli polimer boyalar geliştirilmiştir [20].

2.5.3.2 Metalik Kaplamayla Koruma

Metalik bir yüzeyi korumak amacı ile üzerine kaplanan metal, ya bu metale göre ortama daha dayanıklı soy bir metaldir veya bu metali korumak için kendisi tercihli olarak çözünür ve kapladığı metalin çözünmesine engel olur. Yani daha aktiftir. Birinci tip yani soy metal kaplamalarına örnek, bakır üzerine altın veya gümüş, çelik üzerine kalay kurşun veya krom kaplamadır. İkinci tip, yani aktif kaplama metallerine ise, çelik üzerine çinko, kadmiyum, alüminyum kaplama örnek gösterilebilir.

Soy metaller ile yapılan kaplamalarda meydana gelen hatalar, devamsızlıklar (çizikler, gözenekler, kesik – çentik kenarlar) altından açığa çıkan alt metal soy metale göre anot olur. Bu bölgelerde büyük katot – küçük anot etkisi ile şiddetli korozyon olayı görülür. Bu nedenle bu tip kaplamalarda kaplama hataları çok tehlikeli sonuçlar doğurur.

Aktif kaplama metallerindeki küçük devamsızlıklar altından açığa çıkan alt metal ise korozyona uğramaz. Çünkü aktif metal kendisi harcanarak bir çeşit katodik koruma ile alt

metali korur. Aktif metalleri ile kaplamada ilginç bir yöntem de, aktif metal yüzeylerinin kromat veya fosfat tabakası ile kaplanmasıdır. Bu durumda aktif metalin çözünmesi büyük ölçüde azalır.

Metalik kaplama ile metaller yalnız korozyondan korumakla kalmaz, aynı zamanda dekoratif çekicilik ve işlevsel özellikler de kazanırlar. Hem korozyondan korumak, hem de dekoratif özellik vermek üzere çok katlı tabakalar da uygulanabilir.

Metalik kaplamaların bileşimleri, yapıları, içerdikleri safsızlıklar korozyon dirençlerine etki eder. Metal kaplamaların seçiminde ortam, metal kaplanmış parçanın kabul edilebilir ömrü, dekoratif etki, metalin türü, parçanın şekli ve boyutu, daha sonra uygulanacak imalat yöntemleri ve mekanik faktörler rol oynar. Metalik kaplamalarda sağlanmak istenen korozyon direncinin optimum olması için ise, metalik malzemenin kullanılacağı ortam, üzerine kaplama yapılan alt metal cinsi, kaplamanın türü, uygulama şekli, kaplamanın alt veya üstünde başka kaplama bulunup bulunmadığı gibi faktörler önemlidir.

2.5.3.3 İnorganik Kaplamalar

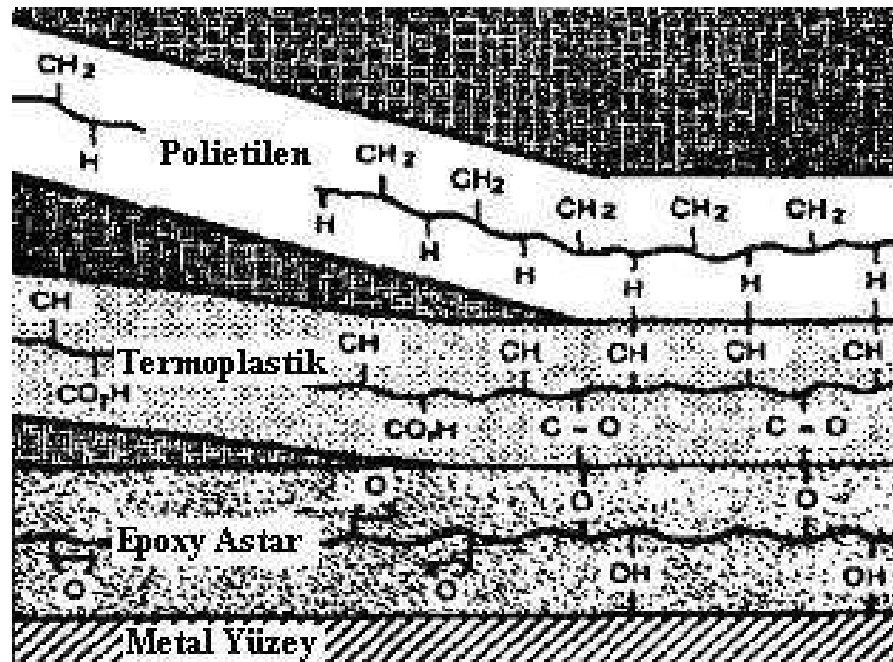
Bazı uygulamalarda düzgün ve dayanıklı bir yüzey elde etmek için çeliğin yüzeyi seramikle kaplanır. Çeliklere genellikle porselen kaplama uygulanır. Porselen kaplama, çeliğin yüzeyine kaynayarak iyi bir yapışma sağlayan ve çeliklerle aynı düzeylerde genleşme katsayısına sahip ince bir cam tabakasıdır. Cam kaplanmış çelik kaplar temizlenmelerindeki kolaylık ve korozyon dirençleri nedeniyle kimya sanayinde kullanılır [20].

2.5.3.4 Ziftleme

Katran ve diğer organik maddelerin kısmi buharlaşmasından veya ayrımsal damıtılmasından kalan artıklar zift olarak adlandırılır. Zift, kaplanacak yüzeylere sıcak olarak sürülür ya da iş parçası 250 – 400 °C sıcaklıklara kadar tavlandıktan sonra zift içine daldırılır. Bu yöntemler dışında özel tabancalar aracılığıyla püskürtülerek uygulanabilir [20].

2.5.3.5 Üç Katlı PE (Polietilen) Kaplama

Üç katlı PE kaplamalar uzun süreli yüksek direnç gösteren kaplamalardır. Şekil 2.31’de üç katlı PE kaplamanın yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.31 Üç katlı PE kaplama

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

2.5.3.6 Biyolojik Kaplama

Gemi gövdeleri gibi metal yüzeylerin deniz suyunda gerçekleşen korozyondan korunması için kullanılır. Bu yöntemin diğer kaplama türlerine göre üstünlüğü deniz yaşamına herhangi bir toksik etkisinin bulunmamasıdır. Deniz suyundaki korozyon, metallerin sudaki minerallerle reaksiyona girerek hidrojen sülfür üretmesi neticesinde gerçekleşir. Günümüzde geçerli olan teknolojiler, hidrojen sülfürün oluşumunu engelleyen inhibitörler ve biyosidlerin (organizma öldürücü kimyasal madde) kullanımını gerektirir. Fakat bu kimyasallarla metallerin iyileştirilmesi yöntemi pahalı ve etkisizdir. Ayrıca deniz yaşamını da olumsuz yönde etkiler [20].

2.5.4 İnhibitörle Koruma

Ortama az miktarda katıldığında korozyon hızını azaltan maddelere korozyon inhibitörü denir. Korozyona karşı dayanıklı fakat pahalı olan bir malzeme kullanmak yerine bazı halde ortama inhibitör katılarak daha ucuz malzemelerin kullanılması yoluna gidilir. İnhibitör kullanımı çukur korozyonuna karşı en ekonomik çözüm yoludur [20].

İnhibitörlerin korozyon hızı azaltıcı etkileri çeşitli şekillerde gerçekleşir. Bazı inhibitörler metal yüzeyinde ince bir film oluşturarak, metal ile çevresi arasındaki reaksiyon hızını yavaşlatır. Bazı halde ortamda bulunan korozyon yapıcı bileşenin, örneğin çözünmüş oksijenin inhibitör tarafından kimyasal olarak bağlanması ile korozyon önlenir. Örneğin; oksitleyici özelliği olan sülfürik asit (H_2SO_4), nitrik asit (HNO_3), fosforik asit (H_3PO_4) gibi asitlerin bulunduğu ortamın asit konsantrasyonunu silikat, nitrat gibi inhibitörlerle azaltarak korozyon önlenir [4].

2.5.5 Anodik ve Katodik Koruma

Metallerin çözünmesini önlemek için onları daha yüksek hızlarda çözünmeye zorlayıp yüzeylerinde koruyucu pasif filmi oluşturmak ve böylece korozyonu yavaşlatmak anodik korumanın temel ilkesidir.

Anodik koruma yapılarak metal sürekli olarak pasif halde tutulur. Pasif hal, korozyon akımının en düşük olduğu haldir. Ancak en düşük korozyon akımı her zaman yeterli derecede düşük olmayabilir ve bu nedenle bazı çözeltiler için bu yöntem uygun çözüm getirmez. Ayrıca; anodik korumada, potansiyel ve akım kontrolünün çok iyi yapılması gerekir. Eğer sistemde bir arıza meydana gelirse, korunan metal kısa sürede korozyona uğrayabilir. Bu nedenle anodik koruma genellikle şiddetli korozyon olayının söz konusu olduğu ortamlarda korozyon hızını azaltmak amacıyla kullanılır.

Anodik koruma sadece pasifleşme özelliği olan metal ve alaşımlara uygulanabilir. (Fe, Ni, Cr, Ti ve alaşımları gibi) Metali pasif bölgede tutabilmek için çok küçük bir akım yoğunluğu yeterli olur. Fakat anodik koruma sistemi bu akım yoğunluğunu sağlayacak karmaşık bir donanıma ve yüksek donanım maliyetine sahiptir [20].

Katodik koruma ise temel ilkeleri elektrokimyasal korozyon teorisine dayanan korozyondan koruma yöntemidir. Katodik koruma, korunacak metali oluşturulacak bir elektrokimyasal hücrenin katodu haline getirerek metal yüzeyindeki anodik akımların giderilmesi

işlemidir [16]. Bu korunacak metali daha aktif bir metal ile (galvanik anot veya kurban anot) eşleyerek sağlanacağı gibi dıştan akım uygulayarak da gerçekleştirilebilir.

Galvanik anotlar koruma sırasında belirli hızlarla çözünerek ağırlıklarını kaybederler. Bunları uygun zaman aralıklarıyla yenileyerek koruma işlevine süreklilik kazandırılır. İkinci yöntemde korunan metal ve anot çiftinin akım üretir nitelikte olması gerekmez. Çünkü koruma için gerekli akım uygun bir dış kaynaktan çekilir. Yavaş çözünürlük yanında ekonomik olan malzemeler anot malzemesi olarak kullanılır. Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde kullanılan anot malzemeleri genellikle çinko, alüminyum ve magnezyumdur. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde Fe-Si, Pb-Sb-Ag ve Ti bazlı anotlar kullanılır.

Çizelge 2.11 Anodik ve katodik korumanın karşılaştırılması [20]

Kriter	Anodik Koruma	Katodik Koruma
Uygulama Alanı	Yalnız pasifleşme özelliği olan metal ve alaşımlara uygulanabilir.	Bütün metal ve alaşımlarına uygulanabilir.
Elektrolit Cinsi	Şiddetli korozyon özelliğinde olan çözelti içinde uygulanabilir.	Zayıf ve orta derecede korozyon çözelti içinde uygulanabilir.
Maliyet	Yapım ve bakım maliyeti yüksek, işletme maliyeti düşük.	Yapım ve bakım maliyeti düşük, işletme maliyeti yüksek.
Trafo Ünitesi	Potansiyel kontrollü	Akım veya potansiyel kontrollü
Akım İhtiyacı	Çok az (pasiflik akımı kadar)	Yüksek (Elektrolit ve kaplama cinsine bağlı)
İşletme Şartları	Pasifleşme potansiyeli tam olarak belirlenmelidir.	Katodik koruma potansiyel kriterleri bellidir.

Çizelge 2.11’de anodik ve katodik koruma yöntemlerinin bazı kriterlere göre karşılaştırılması verilmiştir. Çizelge 2.11’den de anlaşılacağı üzere katodik koruma yöntemi anodik koruma yöntemine göre daha geniş alanlarda ve kontrol edilebilirliği daha fazla olan bir koruma yöntemidir. Ayrıca korozyondan korunma yöntemlerinden katodik koruma dışındakiler korozyon hızını azaltan, başka bir deyişle korozyonu kısmen önleyen yöntemlerdir. Katodik koruma ise korozyonu tamamen önleyen etkili ve rakipsiz bir yöntemdir.

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİ

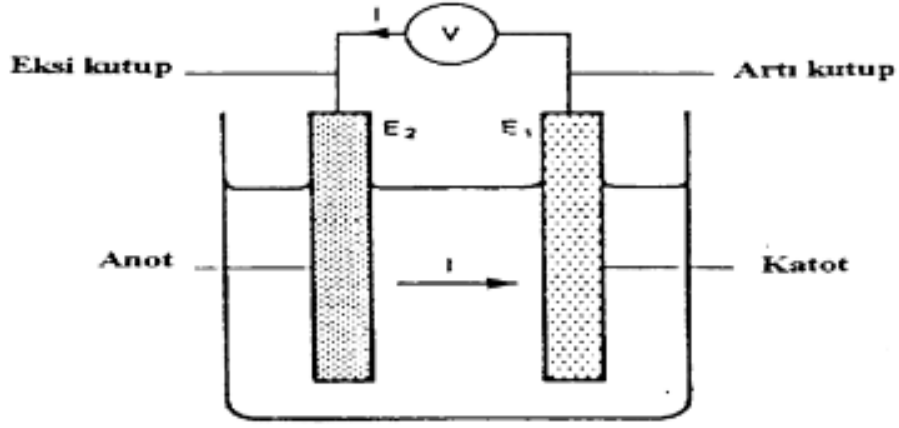
Katodik koruma sistemi toprağa gömülü ve sıvı içindeki metalik yapıların korozyonunu önlemek veya kontrol altına almak için kullanılan elektrokimyasal bir metottur. Temel ilkeleri elektrokimyasal korozyon temellerine dayanmaktadır. Katodik koruma sistemi korozyonu kontrol altına almak için elektrik akımına dayanan aktif bir sistemdir. Eğer koruma elektrik akımı kesilirse, korozyon materyal/çevre kombinasyonu için normal değerlerde gelişmesine devam edecektir. Eğer besleme akımı bütün koruma için yetersizse korozyon azaltılmış değerde gelişecektir. Katodik koruma sistemi tesis edilip gerekli ayarları yapıp ve yeterli koruma akımı sağlandıktan sonra akımlar ve potansiyeller önceki duruma göre genellikle sabit kalacak, akımlarda ve potansiyellerdeki aşırı değişimler sistem arızası olarak görülecektir.

Katodik koruma uygulanan alanlar:

- Yeraltı yakıt ve petrol depolama tankları ve toprak seviyesi tank tabanları
- Yakıt ve petrol dağıtım sistemleri
- Toprak seviyesi veya üstündeki sıvı depolama tanklarının iç kısımları
- İçme suyu dağıtım sistemleri
- Doğal gaz dağıtım sistemleri
- Sıkıştırılmış hava dağıtım sistemleri
- Yangın sistemleri
- Kanalizasyon sistemleri

- Deniz rıhtımlarının çelik kazıkları
- İskele çelik kazıkları

3.1 Katodik Koruma Esasları



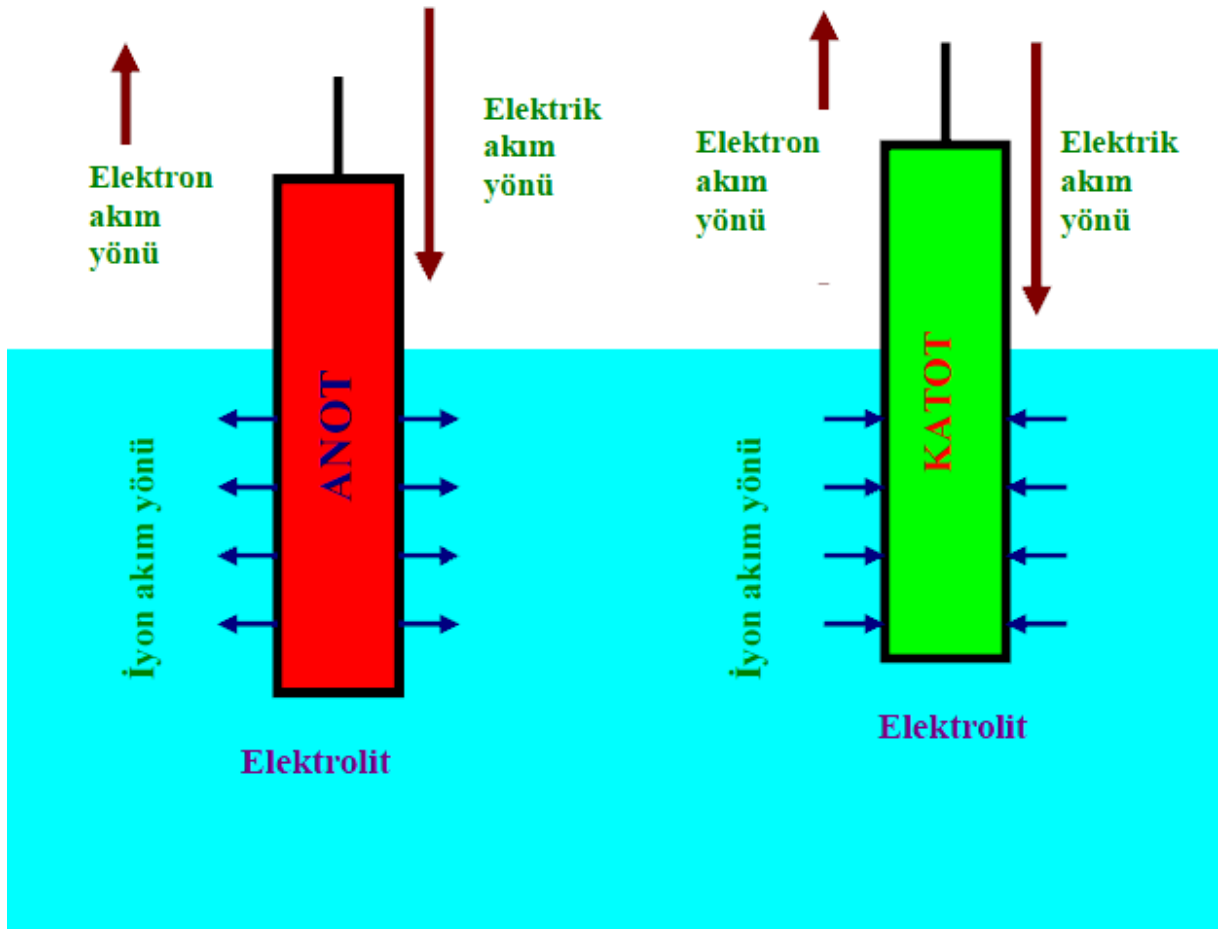
Şekil 3.1 Elektrokimyasal hücre

Katot tepkimesi anottan gelen elektronları kullanarak yürüyebilir. Eğer katotta bu elektronlar kullanılamaz ise, bu durumda anottaki oksidasyon tepkimesi de yürüyemez. Yani katot bölgesinde yeterli oksijen bulunmazsa korozyon meydana gelmez.

Katot tepkimesi için gerekli olan elektronlar bir dış kaynaktan verilecek olursa, anot tepkimesi ile elektron üretilmez. Bu durumda anotta yürüyen korozyon olayı da durmuş olur. Dış akım kaynaklı katodik koruma ile korozyonun önlenmesi bu elektrokimyasal ilkeye dayanır [11]. Metale dıştan uygulanan akım ile verilen elektronlar, metal yüzeyinde yürümekte olan anodik tepkimeleri tam olarak durdururken, katodik tepkimenin hızını da artırır. Anot tepkimeleri artık korunmakta olan metal yüzeyinde değil katodik koruma devresinde bulunan yardımcı anotta yürür. Korunmakta olan metal yüzeyi ise artık tam olarak katot olur.

Korozyona uğramakta olan bir metale kendinden daha aktif bir metal (galvanik anot) bağlanacak olursa, bu durumda katot tepkimesi için gerekli olan elektronlar galvanik anot olarak bağlanan metalin kendiliğinden yürüyen yükseltgenme tepkimesi ile karşılanır. Böylece korunan metal yüzeyindeki bütün anodik tepkimeler tam olarak durur. Galvanik anotlu katodik koruma da bu temel ilkeye dayanır.

Katodik korumanın amacı, belirli bir ortamda her metal için sabit bir potansiyel eşiğinin altında metali toprağa göre daha negatif olarak yükleyerek her tür korozyondan korumaktır.



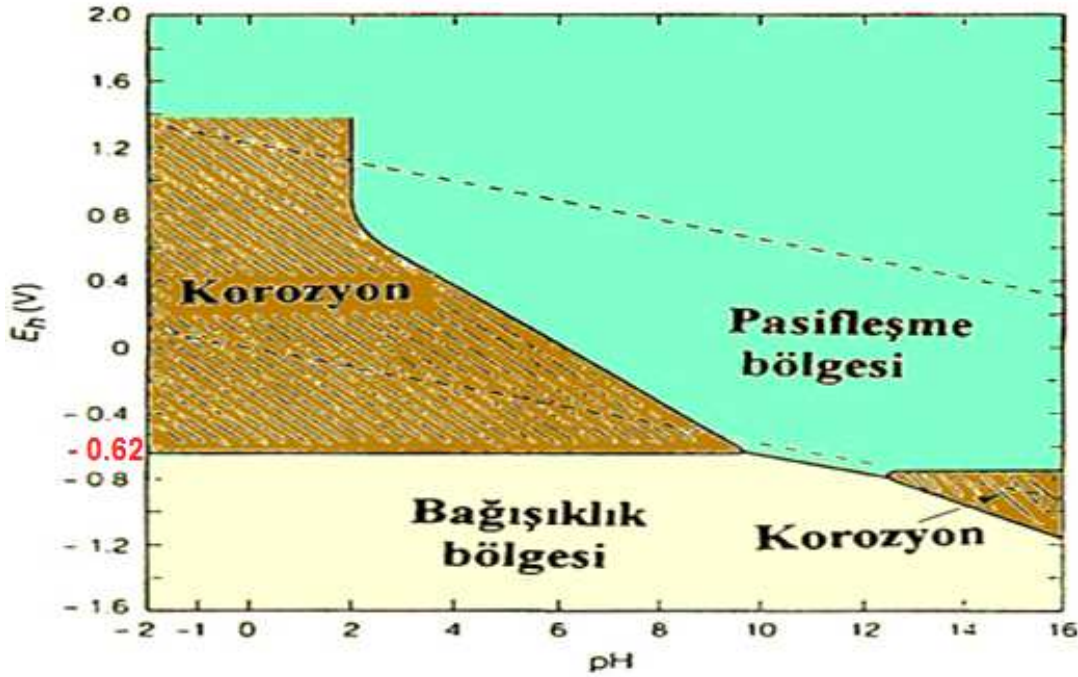
Şekil 3.2 Metalin korozyonu ve katodik koruması

Sonuçta metal yapının her noktasından birim alana devamlı olarak akım gelmektedir. Bu akım yoğunluğu, kaplamanın direncine ve o bölgedeki potansiyel farkına bağlıdır. Dolayısıyla, koruma için seçilen ölçüt, metalin toprak veya deniz ile bağının kuracağı minimum potansiyelidir. Ölçümler genellikle bakır / bakır sülfat (Cu/CuSO_4) elektrotu referans alınarak yapılmaktadır. Bu ölçümler neticesinde elde edilen sonuçların bazı kriterleri sağlaması katodik korumanın güvenilirliğini belirler.

Bir yapının katodik olarak korunması için, metal potansiyelinin katodik yönde belli bir değere kadar polarize edilmesi gerekir. Bunu belirlemek amacıyla pratikte aşağıdaki dört farklı kriter kullanılır.

3.1.1 – 850 mV Kriteri

Demir $-0,62$ V değerinden daha negatif bir potansiyelde iken termodinamik olarak stabil haldedir ve bu bölgede demir korozyona uğramaz (Şekil 3.3). Potansiyel bu bölgede tutulabilirse demir katodik olarak korunur. Hidrojen elektroduna göre $-0,62$ V olan bu potansiyel değeri doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre $-0,850$ Volt'a karşı gelir. Bu değer demir ve çeliğin katodik korunmasında kriter olarak kullanılır [11].



Şekil 3.3 Demir-su sistemi için Pourbaix diyagramı

Katodik korumanın sistemi koruyup korumadığını belirlemek için kolaylığı nedeniyle pratikte genellikle -850 mV kriteri kullanılmaktadır. Buna göre korunmakta olan çelik yapının doymuş bakır / bakır sülfat referans elektrotuna göre akım altında ölçülen potansiyeli -850 mV veya daha negatif bir değerde olmalıdır. Eğer anaerobik bir zemin söz konusu ise, bu değer -950 mV veya daha negatif olması gerekir. Boru/zemin potansiyeli yapıya yeterli bir süre (en az dört saat) akım uygulandıktan sonra ve yapı akım altında iken ölçülür [16].

Pratikte kolaylığı bakımından bu kriter tercih edilmektedir. Ancak bu kriter nötr veya nötre yakın pH derecelerinde ve yüksek olmayan sıcaklıklarda güvenilir sonuçlar verebilir.

3.1.2 300 mV Potansiyel Kayması

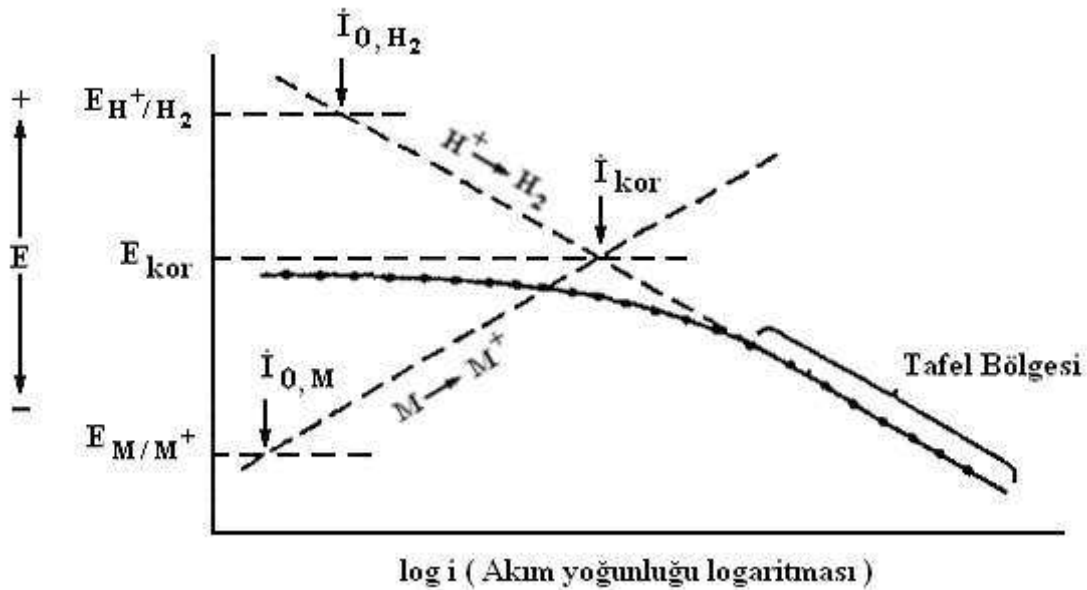
Çelik yapının potansiyelinde katodik koruma akımı uygulanırken, statik potansiyelinden (akım uygulamadan önce ölçülen denge potansiyeli) negatif yönde 300 mV bir kayma sağlanmalıdır. Bu kriterin birinci kriterden farkı, statik potansiyelin -550 mV'dan daha küçük olması halinde katodik korumanın -850 mV'dan daha küçük bir potansiyelde gerçekleşebileceğini kabul etmesidir.

3.1.3 100 mV Polarizasyon Kayması

Çelik yapıda en az 100 mV değerinde bir polarizasyon sapması sağlanmalıdır. Bu değer yapıya en az dört saat katodik yönde bir akım uygulandıktan sonra ölçülen (off) potansiyel değeri ile yapının akım uygulanmadan önceki denge potansiyeli arasındaki fark alınarak bulunur. Teorik yönden en güvenilir kriter budur. Omik düşüş etkisi bulunmayışı nedeniyle 100 mV'luk polarizasyon kayması güvenilir bir kriterdir.

3.1.4 Tafel Bölgesi Başlama Noktası

Katodik korumanın gerçekleşmiş olduğu potansiyel, E-log i grafiği çizilerek lineer bölgenin başlamış olduğu noktaya karşı gelen potansiyel olarak belirlenebilir. E-log i ölçümleri ile hem minimum koruma akım ihtiyacı, hem de koruma potansiyeli belirlenebilir. Ancak bir laboratuvar deneyi olan bu deneyi arazide gerçekleştirmek son derece güçtür [11].

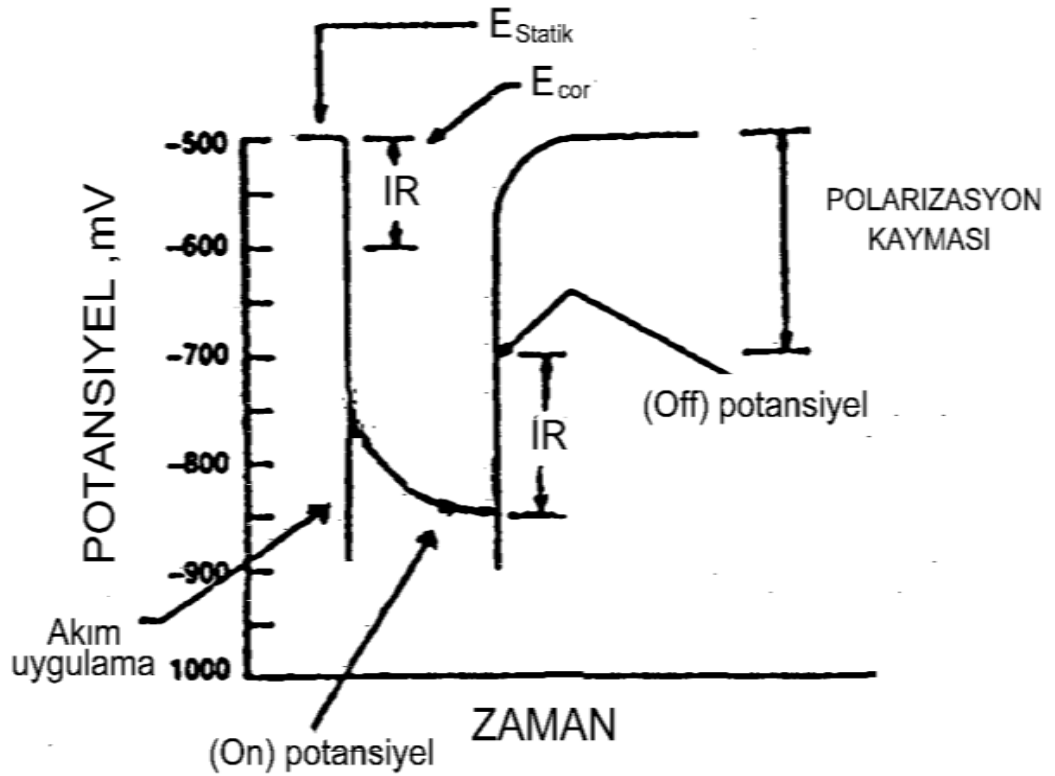


Şekil 3.4 Tafel bölgesi başlama noktası

İlk kriter her iki katodik koruma sistemi için uygulanır. Galvanik anotlu sistemde -850 mV'luk potansiyel, uygun anotlar seçilerek, dış akımlı sistemde ise uygun akım seçilerek uygulanır. Diğer kriterler ise sadece dış akımlı katodik koruma sistemi için uygulanır.

Bu katodik koruma kriterlerinin güvenilirliğini bir örnek üzerinde açıklayalım.

- Doygun bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen statik potansiyel
- $E_s = -500$ mV
- Katodik yönde akım uygulandıktan belli bir süre sonra boru/zemin potansiyeli
- $E_{on} = -850$ mV (1. kritere uygun katodik koruma)
- Bu durumdaki potansiyel sapması
- $E_{on} - E_s = -350$ mV < -300 mV (2. kritere uygun katodik koruma)



Şekil 3.5 Katodik koruma potansiyel kriterleri

- Akım kesildikten sonraki boru-zemin potansiyeli
- $E_{\text{off}} = -700 \text{ mV}$
- Polarizasyon kayması
- $E_{\text{off}} - E_s = -200 \text{ mV} < -100 \text{ mV}$ (3. Kriteria uygun katodik koruma)

Akım kesildikten sonra $IR = 100 \text{ mV}$ 'luk bir omik gerilim düşümü olmuştur. Akım altındaki potansiyel, katodik korunan yapının gerçek metal yapı / zemin potansiyeli olmayıp akım kesildikten sonra elde edilen potansiyele göre katodik koruma sisteminin güvenilirliğini tayin etmek en sağlıklı olan yöntemdir. Yani katodik koruma için güvenilir diyebilmemiz için koruma sisteminin polarizasyon kayması kriterini yerine getirmesi gerekir.

3.2 Katodik Koruma Yöntemleri

Katodik koruma, korunacak metal yapıyı, oluşturulacak bir elektrokimyasal hücrenin katodu haline getirerek, metal yüzeyinde yürümekte olan anodik reaksiyonların durdurulmasıdır. Katodik koruma ile, korunacak metale elektron sağlanıp, metalin iyonlaşması engellenmiş olur. Katodik koruma için gerekli elektronlar;

- Korunacak metalden daha anodik bir metalle galvanik çift oluşturularak,
- Bir dış doğru akım güç kaynağıyla sağlanabilir.

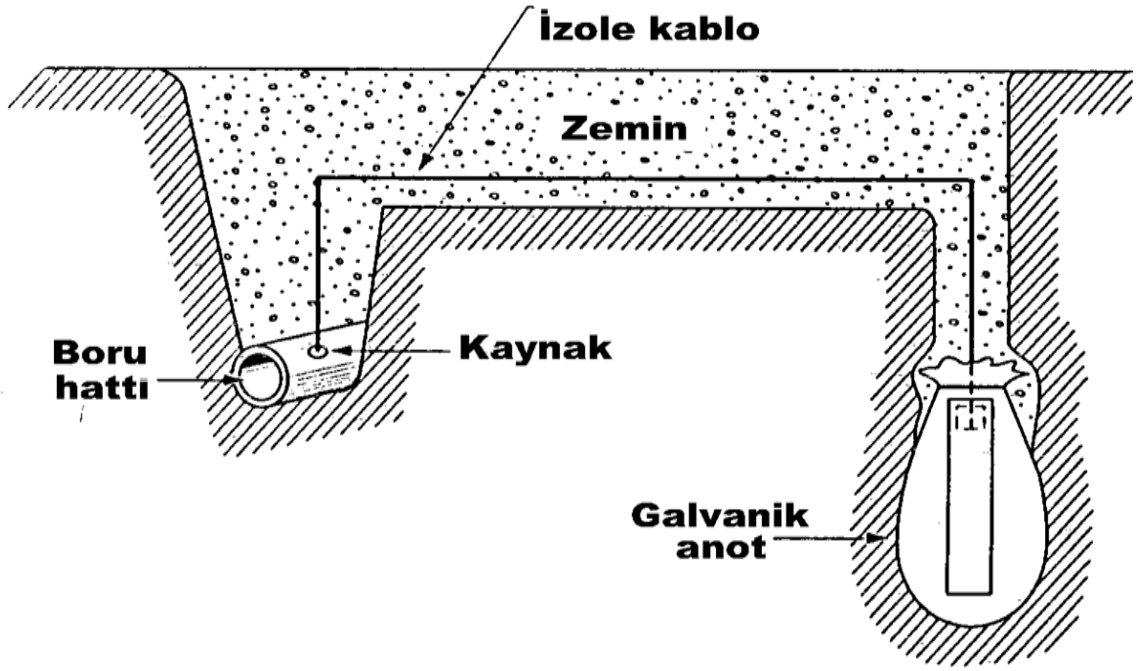
Buna göre katodik korumanın iki tür uygulama şekli vardır:

- 1) Galvanik anotlu katodik koruma
- 2) Dış akım kaynaklı katodik koruma

Galvanik veya dış akım kaynaklı hangi metodun kullanılacağı, yapının cinsi, elektrolit ortamın özellikleri ve ekonomik koşullara bağlıdır.

3.2.1 Galvanik Anotlu Katodik Koruma

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde korunması istenilen metal yapıya kendisinden daha negatif potansiyelde bir metal (anot) bağlanarak bir galvanik pil oluşturulur. Böylece metal yapı katot haline getirilir. Galvanik anot, bulunduğu ortamda pozitif iyon halinde çözünerek akım üretimini sağlayan elektrottur.



Şekil 3.6 Galvanik anotlu katodik koruma sistemi

Galvanik anotlar kendiliklerinden çözünerek aynen bir pil gibi akım üretirler. Galvanik olarak bağlanan metalin kendiliğinden yürüyen yükseltgenme reaksiyonu ile çözünmesi sonucu açığa çıkan elektronlar, dış bağlantıdan katoda (korunan metal yapıya) taşınarak katodik reaksiyon için gerekli olan elektronları sağlar. Böylece korunan metal yüzeyindeki bütün anodik reaksiyonlar tam olarak durur.

Söz konusu yapıyı belli bir süre korumaya yetecek büyüklükte ve miktarda galvanik anotlar uygun noktalardan (zemin özgül direncinin en düşük olduğu bölgelerden) yapıya bağlanır. Anot bir torba içerisinde anot çukuruna yerleştirilir. Torbanın içinde anot çevresine özel dolgu malzemesi doldurulur. Bunun amacı anodun elektriksel direncini azaltmak ve üniform olarak akım üretebilmesini sağlamaktır. Böylece anot üniform olarak harcanır.

Galvanik anotların akım kapasiteleri ve akım verimleri bellidir. Katodik koruma devresine belli süre yetecek miktarda ve sayıda galvanik anot bağlanarak korunacak metal yapının yüzey alanı istenilen süre katot halinde tutulabilir. Bu anotlar seyyar elektrik kaynağı oldukları için elektriğin olmadığı veya bu amaç için elektrik hatları döşemenin elverişsiz ya da çok maliyetli olduğu yerlerde özellikle kullanılır.

Galvanik anotlar koruma sırasında belirli hızlarla çözünerek ağırlıklarını kaybederler. Bunları uygun zaman aralıklarıyla yenilemek, koruma işlevine süreklilik kazandırılır. Kullanılacak anotlar kesinlikle daha önce kullanılmış olmamalıdır.

3.2.1.1 Galvanik Anotlar

Galvanik anotlar akım verdikçe kütle kaybına uğrarlar. Bu bakımdan iyi bir anotta aranan özellikler aşağıdaki gibi olmalıdır [19]:

- Korozyona karşı dayanıklı olması
- Akım kapasitelerinin yüksek olması
- Kendi polarizasyonlarının az olması

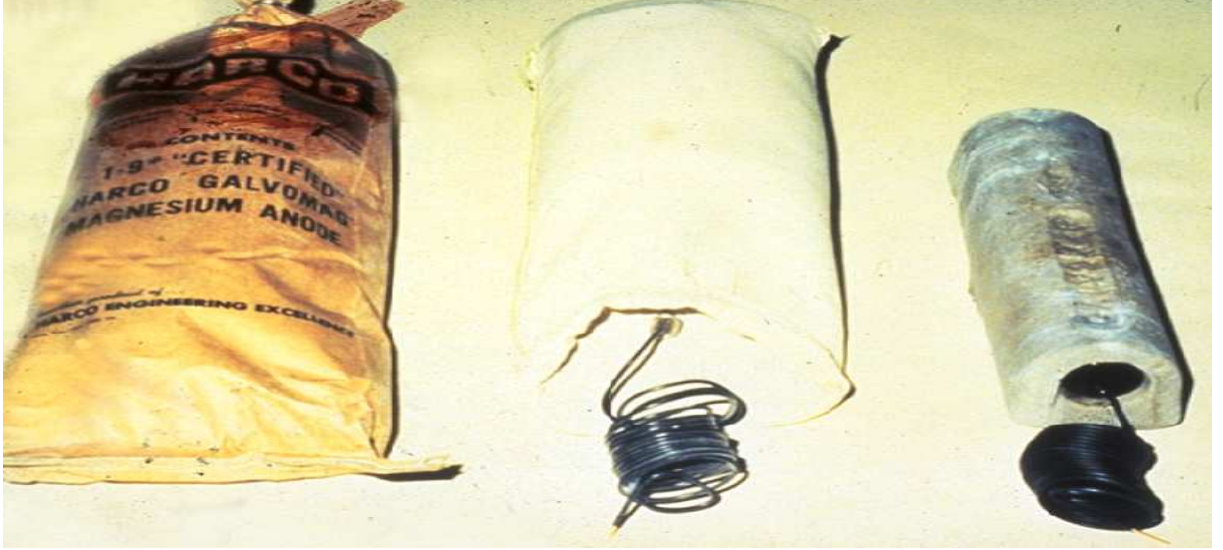
Galvanik anot olarak genellikle magnezyum, alüminyum, çinko ve bunların alaşımları kullanılır. Toprak içi metal yapılarda genellikle magnezyum anotlar, deniz içi metal yapılarda ise alüminyum veya çinko anotlar kullanılmaktadır.

Magnezyum, alüminyum ve çinko anotların özgül direnç bakımından kullanma sınırları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

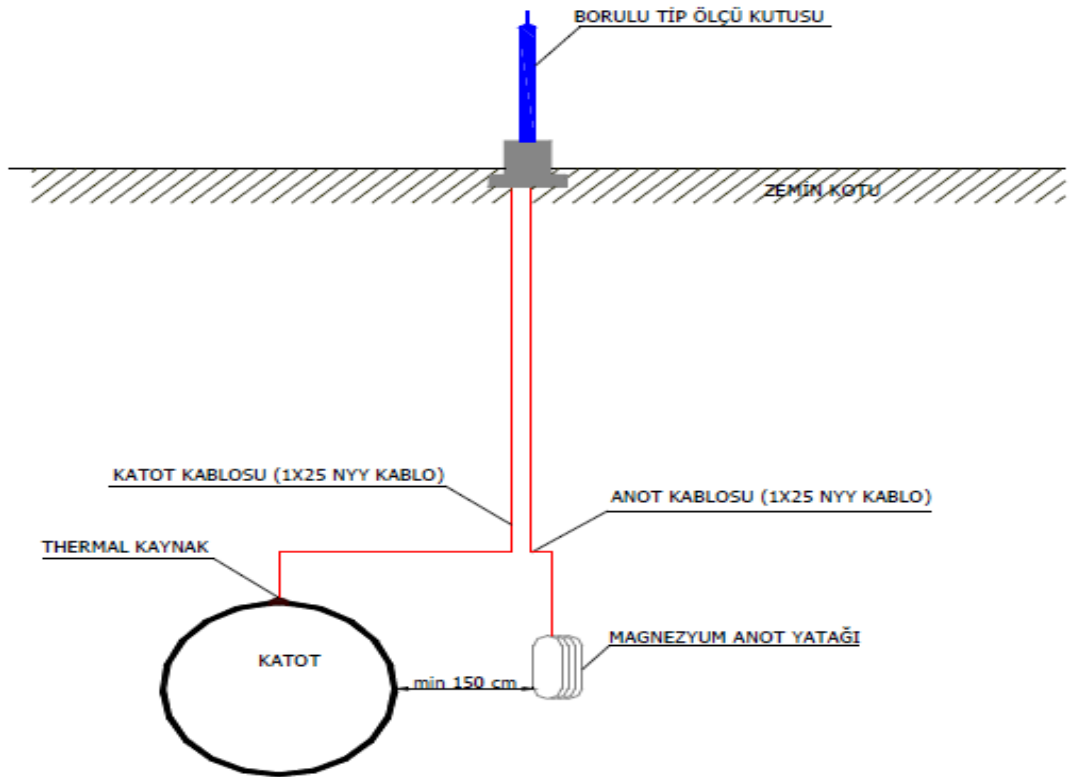
Çizelge 3.1 Galvanik anotların özgül dirence göre kullanım sınırları [19]

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

Magnezyum Anotlar: Su, akaryakıt, doğalgaz boru hatları ve LPG tanklarının katodik korumasında kullanılırlar. Galvanik anotlar içerisinde kullanım alanı en geniş olanı magnezyum anotlardır.



Şekil 3.7 Magnezyum anot



Şekil 3.8 Kara yapıları için magnezyum anotlu galvanik katodik koruma şeması

Saf magnezyumun standart potansiyeli -2,4 V olup doymuş bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre potansiyeli -1,55 V dur. Magnezyum anot içerisinde az miktarda mangan katarak bu potansiyeli -1,75 V negatif yönde arttırmak mümkündür. Yüksek potansiyelli olan bu magnezyum anotlar yüksek özgül dirençli ve tatlı sularda kullanıma uygundur [19].

Magnezyum anotların akım verimi çok düşüktür. Uygun anot yatağı içerisinde olsa bile magnezyum anotların verimi % 50-60 arasında kalır. Magnezyum anotların elektrokimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Magnezyum anotların elektrokimyasal özellikleri [21]

ÖZELLİK	AZ-63 TİP MAGNEZYUM ANOT	YÜKSEK POTANSİYELLİ MAGNEZYUM ANOTLAR
Teorik Akım Kapasitesi	2200 A.saat/kg, 4 kg/A.yıl	2200 A.saat/kg 4 kg/A.yıl
Anot Akım Verimi (Minimum)	% 50	%50
Gerçek Akım Kapasitesi	1210 A.saat/kg 7,16 kg/A.yıl	1100 A.saat/kg 7,88 kg/A.yıl
Elektrot Potansiyeli (Cu/CuSO₄’a göre)	1450 – 1650 mV	1650 – 1750 mV
Çeliğe Karşı Devre Potansiyeli	650 – 750 mV	750 - 950 mV
Yoğunluk	1.86 g/cm ³	1.78 g/cm ³

Magnezyum anotların ağırlıkları genelde libre (lb) ile ifade edilir.

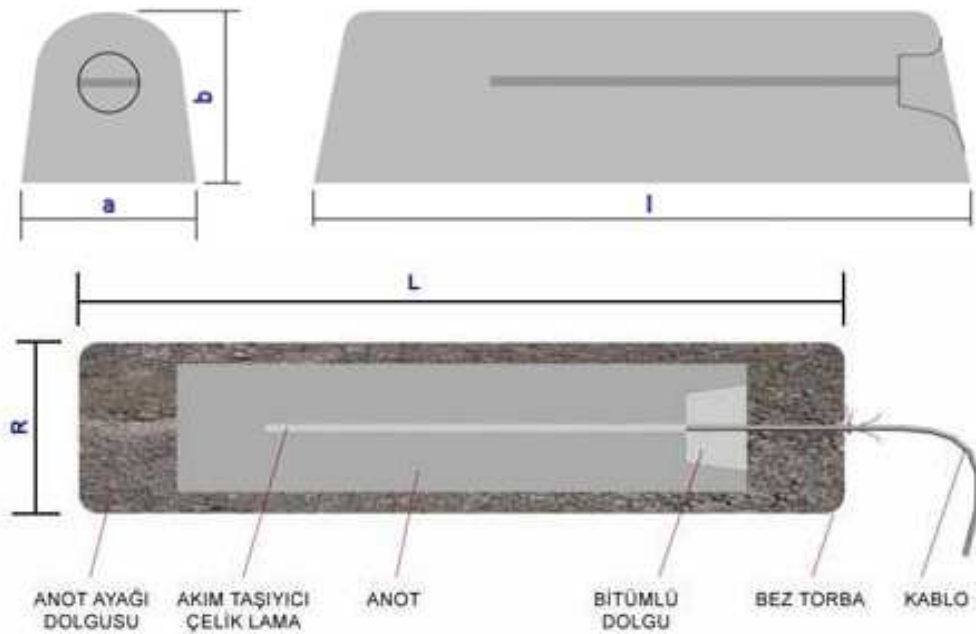
$$1 \text{ lb} = 0,455 \text{ kg} \quad (3.1)$$

İller Bankası projelerinde genelde 17 lb ve 32 lb ağırlığındaki magnezyum anotlar kullanılır. Katodik koruma sisteminin daha uzun ömürlü için ise yüksek potansiyelli magnezyum anot kullanılması daha uygundur. Magnezyum anotların kimyasal bileşimleri Çizelge 3.3’de verilmiştir [19].

Çizelge 3.3 Magnezyum anotların kimyasal özellikleri

Element	AZ-63 Magnezyum Anot	Yüksek Potansiyelli Magnezyum Anot
Bakır (en çok %)	0,05	0,002
Alüminyum (%)	5,3–6,7	0,003
Silisyum (en çok %)	0,10	–
Demir (en çok %)	0,01	0,025
Manganez (en az %)	0,15	0,5–1,5
Nikel (en çok %)	0,01	0,002
Çinko (%)	1,5–3,5	0,004
Magnezyum	Geri Kalan	Geri Kalan

Magnezyum anotların genelde Şekil 3.9’da gösterilen D profili şeklindedir.



Şekil 3.9 D profilli magnezyum anot

AZ-63 tip ve yüksek potansiyelli magnezyum anotlara ait boyutlar Çizelge 3.4 Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da verilmiştir. Magnezyum anotların boyutlandırmasında Çizelge 3.4’deki Türk Standardı olsa da genel olarak NACE Standardı kullanılır. Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6 değerleri NACE Standardı’na göre dir.

Çizelge 3.4 Türk Standardı magnezyum anot boyutları [22]

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 kütle sinde tolerans % 5, Uzunluk ölçülerinde tolerans % 3’dür				

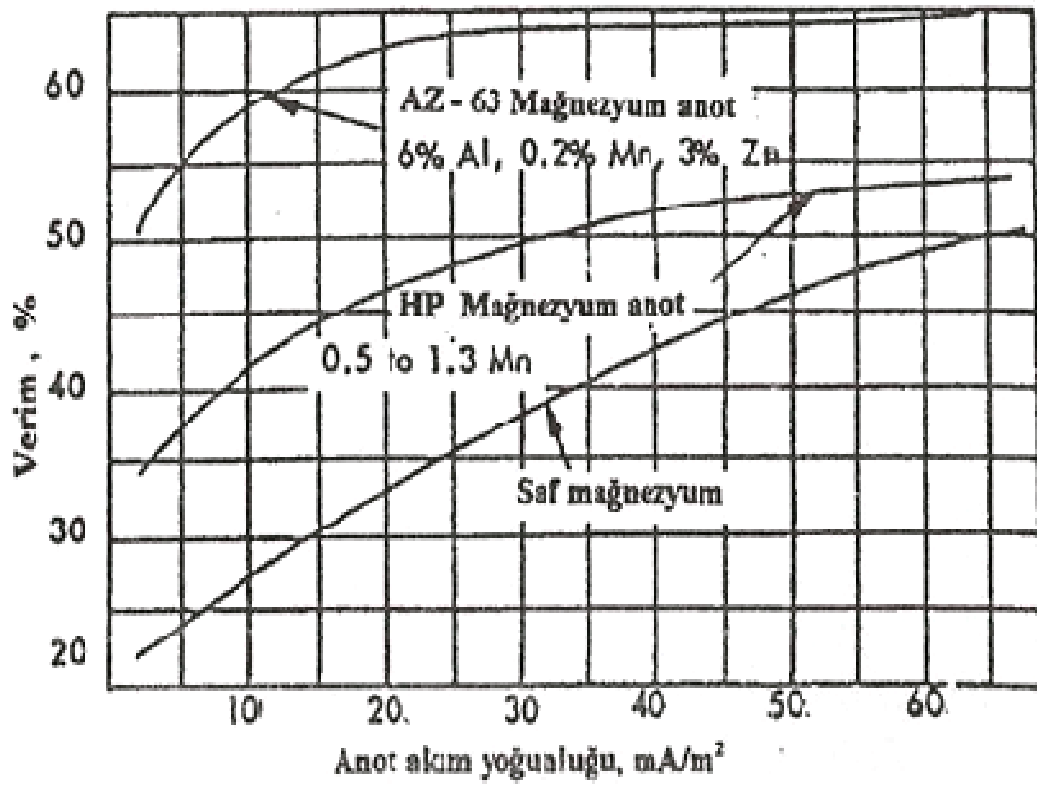
Çizelge 3.5 NACE Standardı AZ-63 tip magnezyum anotların boyutları [11]

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

Çizelge 3.6 NACE Standardı Yüksek potansiyelli magnezyum anotların boyutları [11]

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

AZ-63 tip magnezyum anotların verimleri normal halde yüksek potansiyelli anotlardan yüksektir. Magnezyum anotların anottan çekilen akım şiddeti arttıkça akım verimi de artar. Şekil 3.10’da magnezyum anotlar için akım verimini akım yoğunluğuna göre değişimi verilmiştir [11].



Şekil 3.10 Magnezyum anotların akım verimini akım yoğunluğuna göre değişimi

Çinko Anotlar: Çinko anotlar ortam özgül direncinin 1000 Ohm.cm' den düşük olduğu tuzlu su, tatlı su ve toprak zemin içindeki demir ve çelik yapıların katodik korumasında kullanılırlar [19].

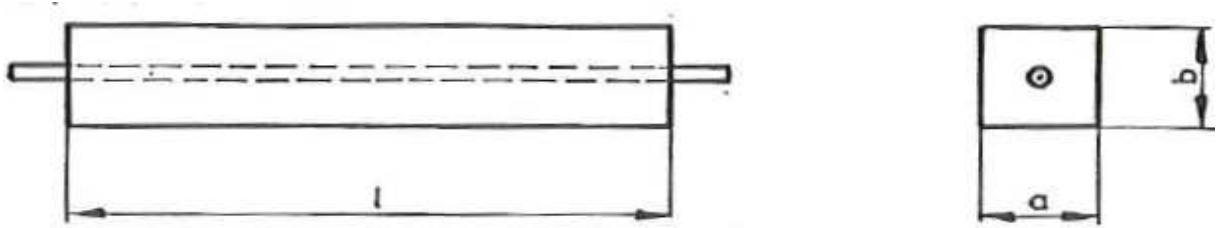
Genel olarak 2 tip olarak imal edilirler. ASTM-B418 Tip I ve ASTM-B418 Tip II standartlarına uygun olarak imal edilirler. Tip I Deniz suyu ve tuzlu çamur gibi ortamlarda, tatlı su ve toprak zemin gibi ortamlarda ise Tip II alaşımı kullanılmaktadır [21].

Toprak zeminlerde kullanılacak olan çinko anotlar ortam özgül direncini düşürmek ve anodun üniform bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla %25 jips, %50 bentonit, %25 sodyum sülfat karışımıyla bez çuvallara doldurularak paketlenmektedir.

Çizelge 3.7 Çinko anotların elektrokimyasal özellikleri [21]

ÖZELLİK	ASTM-B418 Tip I	ASTM-B418 Tip II
Teorik Akım Kapasitesi	820 A.saat/kg 10,66 kg/A.yıl	820 A.saat/kg 10,66 kg/A.yıl
Anot Akım Verimi (Minimum)	% 95	% 90
Gerçek Akım Kapasitesi	780 A.saat/kg 11,22 kg/A.yıl	740 A.saat/kg 11,84 kg/A.yıl
Elektrot Potansiyeli (Cu/CuSO₄' a göre)	1100 mV	1100 mV
Çeliğe Karşı Devre Potansiyeli	250 mV	250 mV
Yoğunluk	7.13 g/cm ³	7.14 g/cm ³

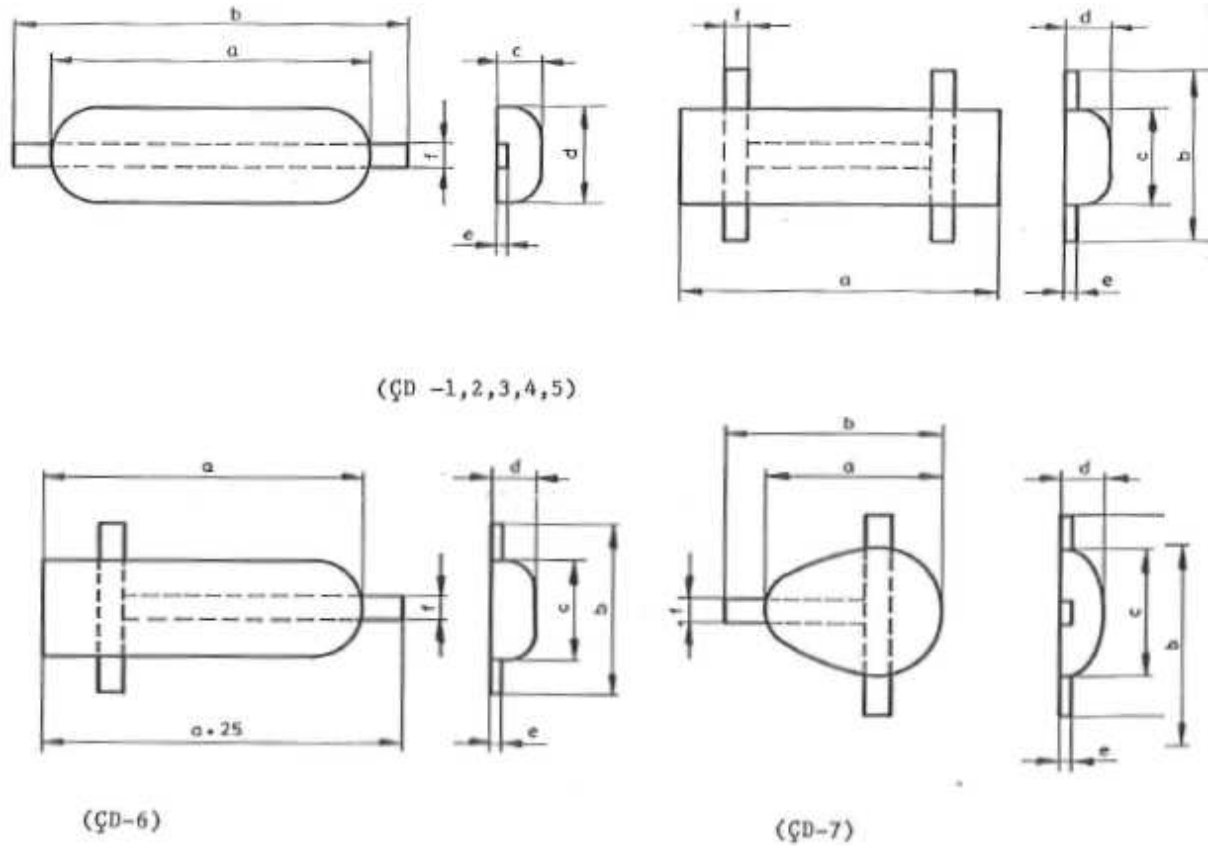
Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’de sırası ile zemin ve deniz içinde kullanılan TS 9234 standardına uygun çinko anotlara ait boyutlandırmalar verilmiştir [11].



Şekil 3.11 Zemin için çinko anot profili

Çizelge 3.8 Zemin içerisinde kullanılan çinko anotların boyutları

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				



Şekil 3.12 Deniz için çinko anot profili

Çizelge 3.9 Deniz içerisinde kullanılan çinko anotların boyutları

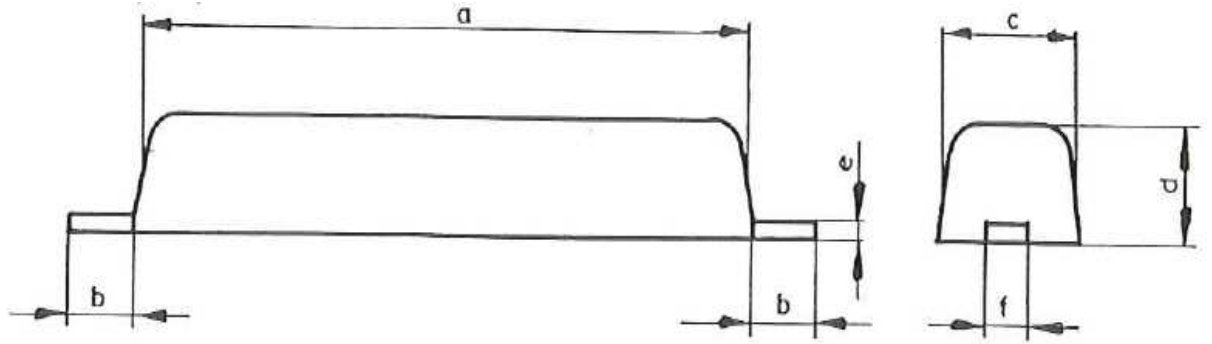
Anot Tipi	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	Anot Kütlesi (kg)	
							Brüt	Net
ÇD-1	250	300	30	80	6	25	3,0	2,8
ÇD-2	305	355	32	77	6	25	5,1	4,6
ÇD-3	300	350	55	150	6	25	11,0	10,5
ÇD-4	750	780	15	170	6	25	13,0	12,0
ÇD-5	500	550	50	125	6	40	20,0	19,3
ÇD-6	500	175	125	50	6	40	20,0	19,3
ÇD-7	370	400	280	45	6	40	24,0	23,1
Anot kütlesinde tolerans % 5, Uzunluk ölçülerinde tolerans % 3'dür								

Alüminyum Anotlar: Alüminyum anotlar özgül direnci 2000 Ohm.cm den düşük deniz suyu veya Cl iyonu içeren ortamlardaki demir ve çelik yapıların katodik korumasında kullanılırlar [19].

Alüminyum anotlar ancak deniz suyu içerisinde veya zemin özgül direnci düşük tuzlu sularda kullanılabilir.

Çizelge 3.10 Alüminyum anotların elektrokimyasal özellikleri [11]

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/CuSO₄ 'a göre)	1100 mV
Çeliğe Karşı Devre Potansiyeli	250 mV
Yoğunluk	2.70 g/cm ³



Şekil 3.13 Deniz içi yapılar için alüminyum anot profili

Çizelge 3.11 Türk Standardı deniz içi yapılar için alüminyum anotların boyutları [22]

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	14,3	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	50,0	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 anodun boy/çap oranı büyüdükçe direnci azalacağından, özgül elektrik direnci yüksek olan zeminlerde, aynı kütlede fakat daha uzun boylu olan anotlar kullanılmalıdır. Toprak elektrik özgül direncine göre tavsiye edilen anot ağırlıkları Çizelge 3.12’de verilmiştir [11].

Çizelge 3.12 Toprak elektrik özgül direncine göre tavsiye edilen anot ağırlıkları

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

Galvanik anotlar akım verdikçe kütlelerinden kaybederler ve anot kütlesi tamamen bitinceye kadar kullanılamazlar. Anot kütlesi belirli bir değerin altına düşünce gerekli akım ihtiyacını karşılayamaz. Bu sebeple anotların kütlelerinin ancak % 85’i faydalı olarak kullanılabilir [11].

3.2.1.2 Galvanik Anot Yatakları

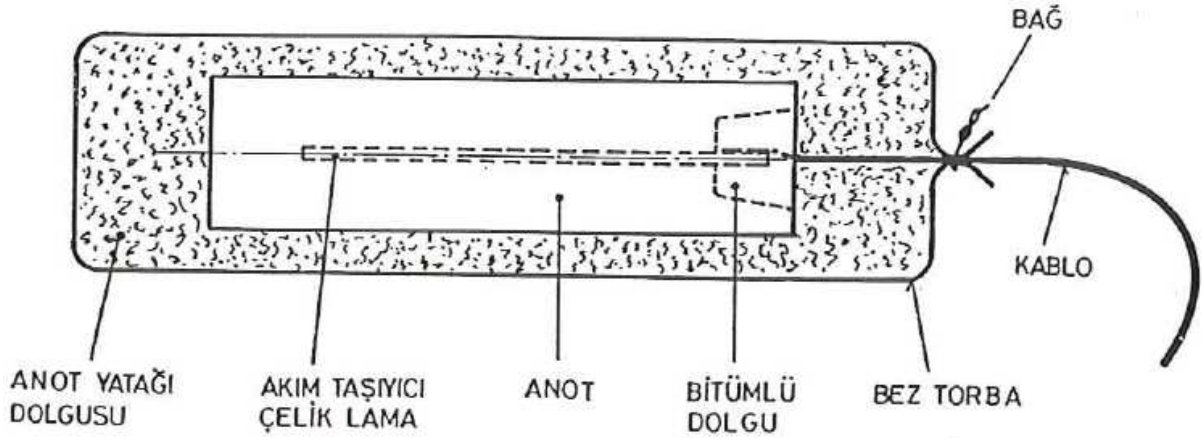
Galvanik anotlar doğrudan zemin içine konulmayıp, direnci azaltmak ve anottan üniform olarak maksimum akım çıkışını sağlamak amacıyla bir anot yatağı dolgusu içine konulur. Çinko ve magnezyum anotlar için anot yatağı dolgu maddesi bentonit içine alçı (jibs) ve sodyum sülfat katılarak elde edilir. Burada jibsin görevi çözelti içine sülfat iyonu vererek anot yüzeyinde hidroksit filmi oluşmasını önlemektir. Alçı taşı suda yaklaşık olarak 2 g/L çözünür. Böylece anot çevresinde özgül direncin düşmesine de yardımcı olur. Sodyum sülfatın çözünürlüğü çok yüksektir. Sodyum sülfat katılarak anot yatağı özgül direnci 100 Ohm.cm’nin altına düşürülebilir. Bentonitin su tutma kapasitesi yüksektir. Bentonit, anot yatağının sürekli rutubetli halde kalmasını sağlar [5].

Magnezyum ve çinko anotlar için kullanılan anot yatağı dolgusu bileşimleri Çizelge 3.13’ de verilmektedir [12].

Çizelge 3.13 Anot yatağı dolgu malzemesi

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 (Na_2SO_4)	% 5 – 10	% 25 – 30
Özgül Elektrik Direnci	50–100 Ohm.cm	25–50 Ohm.cm

Tip A dolgusu magnezyum anotlar için, Tip B dolgusu ise çinko anotlar için uygundur. Yer altı çelik boru hatlarının katodik korunmasında en fazla kullanılan magnezyum anotlarda dolgu maddesi olarak % 70 Jips, % 25 Bentonit ve % 5 Sodyum Sülfat karışımı kullanılır. Sodyum Sülfat oranı zemin özgül direncinin artışına bağlı olarak % 15 ile % 20 oranına kadar yükseltilebilmektedir. Dolgu maddesi kullanılması sayesinde anot yatağı özgül direncini 50-100 Ohm.cm'ye kadar düşürmek mümkündür [19].



Şekil 3.14 Paket galvanik anot

Galvanik anotların bir anot yatağı içine konulması şu avantajları sağlar [5]:

- Anot yatağı içinde anot üniform olarak harcanır. Bunun sonucu olarak anodun kullanılabilme yüzdesi artar.
- Anot yatağı, anot çevresinin sürekli olarak rutubetli kalmasını sağlar. Böylece anot direnci düşürülerek akım çıkışı artırılmış olur.
- Anot yatağı kullanılarak, galvanik anotları yüksek özgül dirençli zeminler içinde de kullanabilmek mümkün olur.

3.2.1.3 Galvanik Anot Seçimi

Galvanik anotlu koruma sisteminde magnezyum, çinko ve alüminyum anotlardan hangisinin kullanılmasının daha uygun olacağı aşağıdaki kriterlere göre belirlenir.

- Alüminyum anotların toprak içerisinde kullanılması uygun değildir.
- Çinko anotların akım verimleri yüksek ve fiyatları da daha ucuzdur. Ancak bu anotların potansiyeli düşük olduğundan, yalnız düşük özgül dirençli zeminler ve tuzlu sular içinde kullanılabilir.
- Yüksek özgül dirençli ve tatlı su içinde magnezyum anotların (özellikle yüksek yoğunluklu magnezyum anotlar) kullanılması uygundur.
- Özgül direnci 3000 Ohm.cm den daha yüksek olan zeminlerde çinko anotların, özgül direnci 5000 Ohm.cm den daha yüksek olan zeminlerde de magnezyum anotların kullanılması halinde anot akımı çıkışında ve buna bağlı olarak akım veriminde önemli derecede azalmalar olur.
- Magnezyum anotlara göre çinko anotların akım verimleri daha yüksek ve fiyatları daha ucuzdur. Fakat çinko anotların potansiyelleri düşük olduğu için bu anotlar sadece düşük özgül dirençli zeminler ve tuzlu sular içinde kullanılabilir.
- Aynı koşullarda magnezyum anotlardan çekilebilen akım, çinko anotlara göre daha fazladır.

- Çinko anotlar ile sistem potansiyelini en çok -1 Volt'a kadar çıkarmak mümkün olup, bu değere eriştikten sonra akım şiddeti kendiliğinden azalır. Böylece çinko anotlar ile hiçbir zaman aşırı koruma yapılmamış olur.
- Magnezyum anotlar boru/zemin potansiyelini gereğinden daha yüksek değerlere taşıyarak aşırı koruma yapılabilir.
- Aynı büyüklükteki çinko anotların ömrü, magnezyum anotlardan daha fazla olup uzun ömürlü katodik koruma sistemleri için çinko anot kullanılabilir.
- Galvanik anotlardan çekilen akım şiddeti, anot-katot arasındaki potansiyel farkı ile anot direncine bağlı olup, anot direnci ne kadar azaltılabilirse anottan çekilen akım şiddeti de o oranda artar. Bu durumda anot yüzey alanı artırılarak örneğin bir anot yerine eşit kütlede küçük boyutlu iki anot kullanılarak anot akım çıkışı artırılabilir. Özellikle yüksek özgül dirençli zeminler içinde küçük boyutlu çok sayıda anot kullanmak daha uygundur.
- Anot seçiminde en önemli faktör akım maliyeti olup en ucuz akımı alüminyum anotlar sağlar. Ancak alüminyum anotlar toprak içerisinde kullanılmazlar. Alüminyumdan sonra en ucuz akımı çinko anotlar, daha sonra ise magnezyum anotlar sağlar.

3.2.1.4 Galvanik Anotların Ömrü

Birim kütledeki anottan çekilen maksimum akım miktarına “teorik akım kapasitesi” denir. Bu miktar A.saat/kg (veya kg/A.yıl) olarak ifade edilir. Bu değer kullanılarak belli bir akım ihtiyacı için kaç kg anot kütlelerinin gerekli olduğu veya belli kütledeki bir anodun kaç yıl dayanacağı (ömrü) hesaplanabilir. Ancak pratikte anot ömrüne etki yapan iki önemli faktörün de göz önünde bulundurulması gerekir. Bunlardan biri “anot akım verimi”dir. Anot akım verimi, anottan çekilen akım miktarının Faraday Yasası ile hesaplanan akım miktarına oranı olarak tanımlanır. Bir de anot kullanma faktörü vardır. Anotlar kullanıldıkça kütle kaybı ile birlikte yüzey alanları da küçülür. Bunun sonucu olarak anot direnci gittikçe artar. Diğer taraftan anodun harcanması hiç bir zaman üniform olarak yürümez ve anot kütlesi tam olarak bitinceye kadar kullanılamaz. Pratikte galvanik anot kütlelerinin en çok % 85’ inin kullanılabileceği kabul edilir. Bu faktörler göz önüne alınarak anot ömrü aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\text{Anot Ömrü} = \frac{\text{Anot Kütlesi (kg)} \times \text{Anot Verimi} \times \text{Eskime Faktörü}}{\text{Akım Şiddeti (A)} \times \text{Teorik Akım Kapasitesi (kg/A.yıl)}} \quad (3.2)$$

- Eskime Faktörü: 0,85 alınır.
- Teorik Akım Kapasitesi: 4 (kg / A.yıl) (Mg anot için)

Galvanik anotlar akım verdikçe kütlelerinden kaybederler ve anot kütlesi tamamen bitinceye kadar kullanılamazlar. Anot kütlesi belirli bir değerin altına düşünce gerekli akım ihtiyacını karşılayamaz. Bu sebeple anotların kütlelerinin ancak % 85'i faydalı olarak kullanılabilir [11]. Bu yüzden eskime faktörü 0,85 olarak kabul edilir.

Örnek 3.1

17 lb'lık yüksek potansiyelli veya AZ-63 tip magnezyum anotlar bir çelik boru hattına bağlanacaktır. Anot, kablo ve katot dirençleri toplamı $R = 20$ Ohm dur. Buna göre anot ömrünü her iki tip anot içinde hesaplayalım.

İller Bankası katodik koruma hesaplarında yüksek potansiyelli magnezyum anotların çeliğe karşı devre potansiyeli -750 mV ve AZ-63 tip magnezyum anotların çeliğe karşı devre potansiyeli -650 mV alınır.

Yüksek potansiyelli magnezyum anot kullanılırsa;

Anot verimi Çizelge 3.2'den % 50, teorik akım kapasitesi ise 4 kg/A.yıl olarak alınır.

Anottan çekilen akım şiddeti,

$$i = E/R = 750/20 = 37,5 \text{ mA}$$

$$17 \text{ lb} = 17 \times 0,455 = 7,735 \text{ kg}$$

Anot ömrü;

$$\text{Anot Ömrü} = \frac{7,735 \times 0,50 \times 0,85}{37,5 \cdot 10^{-3} \times 4} = 21,92 \text{ yıl olarak bulunur.}$$

AZ-63 tip magnezyum anot kullanılırsa;

Anot verimi Çizelge 3.2'den % 50, teorik akım kapasitesi ise 4 kg/A.yıl olarak alınır.

$$i = E/R = 650/20 = 32,5 \text{ mA}$$

$$17 \text{ lb} = 17 \times 0,455 = 7,735 \text{ kg}$$

Anot ömrü;

$$\text{Anot Ömrü} = \frac{7,735 \times 0,50 \times 0,85}{32,5 \cdot 10^{-3} \times 4} = 25,29 \text{ yıl olarak bulunur.}$$

İller Bankası katodik koruma projelerinde anot ömrünün en az 15 yıl olması istenir [23]. İki anot tipi de 15 yıldan fazla koruma yapabileceğinden bu iki anot tipinden biri tercih edilebilir. Genel olarak İller Bankası katodik koruma projelerinde çeliğe karşı devre potansiyeli daha yüksek olduğu için ve daha uzun süre koruma yapabileceğinden yüksek potansiyelli magnezyum anotlar tercih edilir.

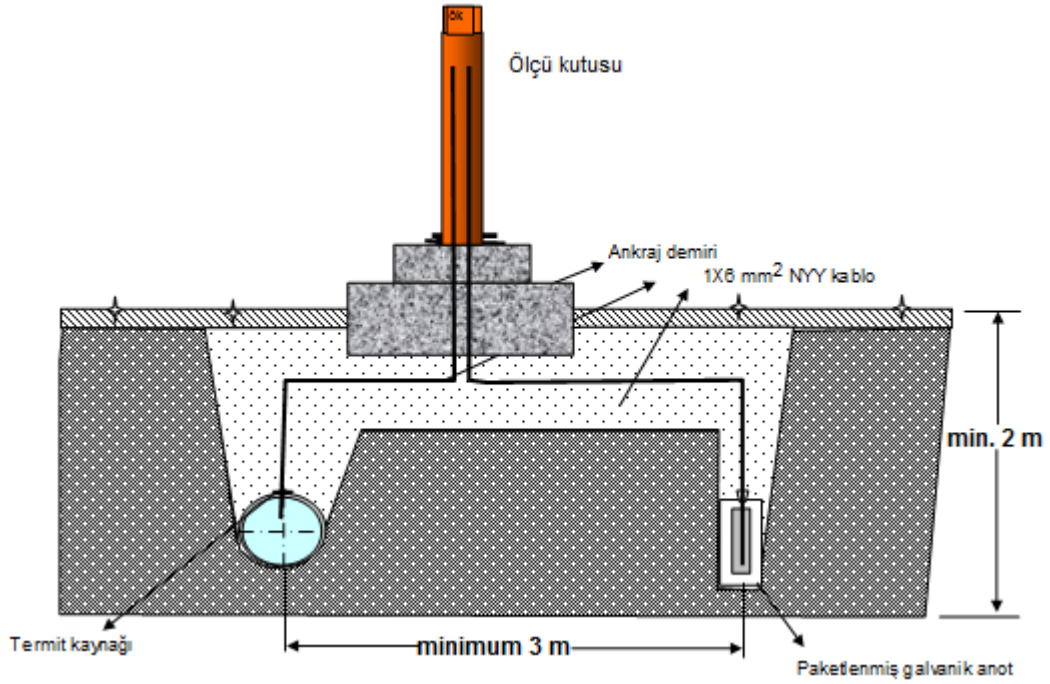
3.2.1.5 Galvanik Anotların Montajı

Katodik olarak korunacak yapı toprak özgül direncinin büyük değişiklikler göstermediği bir zemin içerisinde yer alıyorsa galvanik anotlar korunacak yapının boyunca eşit aralıklarla dağıtılarak yerleştirilmelidir. Eğer toprak özgül direnci kısa mesafelerde büyük değişiklikler gösteriyorsa anotlar zemin özgül direncinin düşük olduğu bölgelere yerleştirilmelidir. Bu bölgeler hem galvanik anodun en verimli çalışacağı hem de katodik korunan yapının akım ihtiyacının en fazla olduğu bölgelerdir [12].

Galvanik anotların montajı yapılırken uyulması gereken bazı kurallar vardır. Bunları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

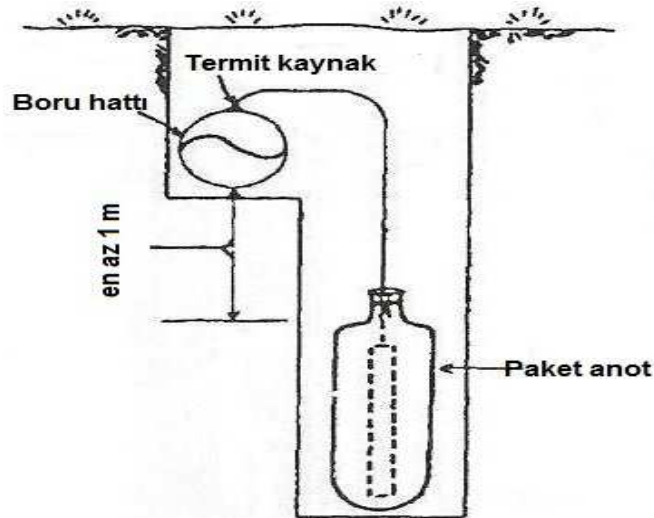
- Galvanik anotla boruya en az elektriki direnç oluşturulacak şekilde termit tipi kaynakla bağlanır.
- Galvanik anotların boruya bağlanacağı noktada ölçü kutusu kullanılması gerekir. Ölçü kutusuz montajı yapılacak olan galvanik anotların kontrolü zordur.
- Galvanik anotlar için kullanılan bütün yeraltı kabloları TS 212'ye uygun NYY tipi elektrolitik bakırdan yapılmış çok sayıda ya da tek damarlı en az 6 mm² kesitli olmalıdır.

- Galvanik anotlar korunacak olan yapıdan en az 3 m uzağa ve en az 2 m derinliğe gömülmüş olmalıdır [12].



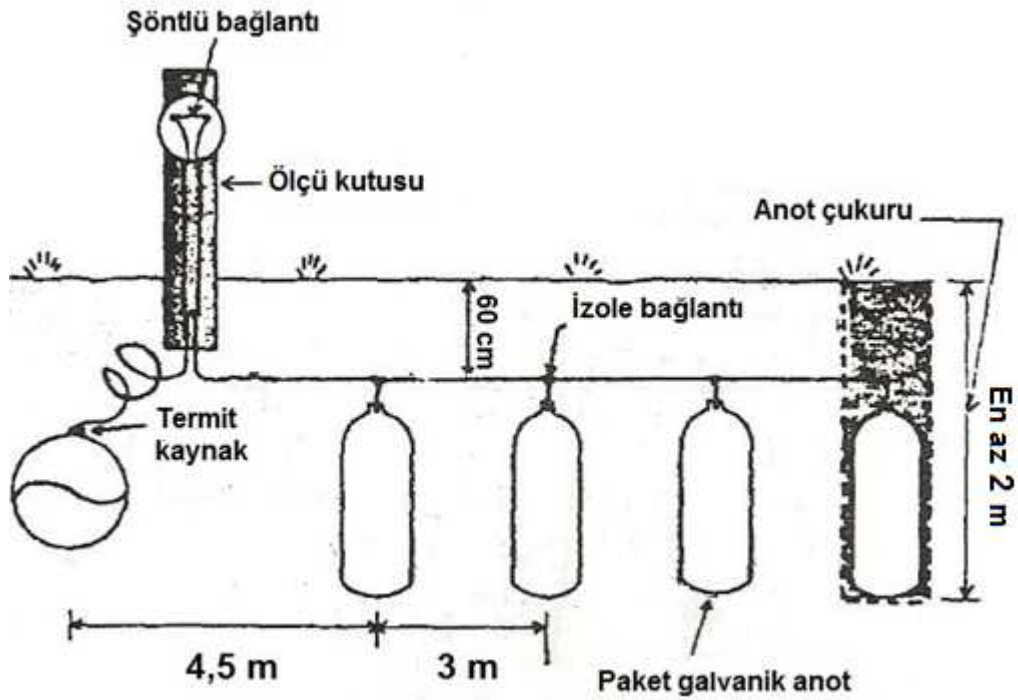
Şekil 3.15 Galvanik anotların yerleştirilme planı

- Ayrıca anot boru seviyesinin en az 1 m altında olmalı ve zemin kuru ise ıslak bölgeye kadar inilmelidir [11].



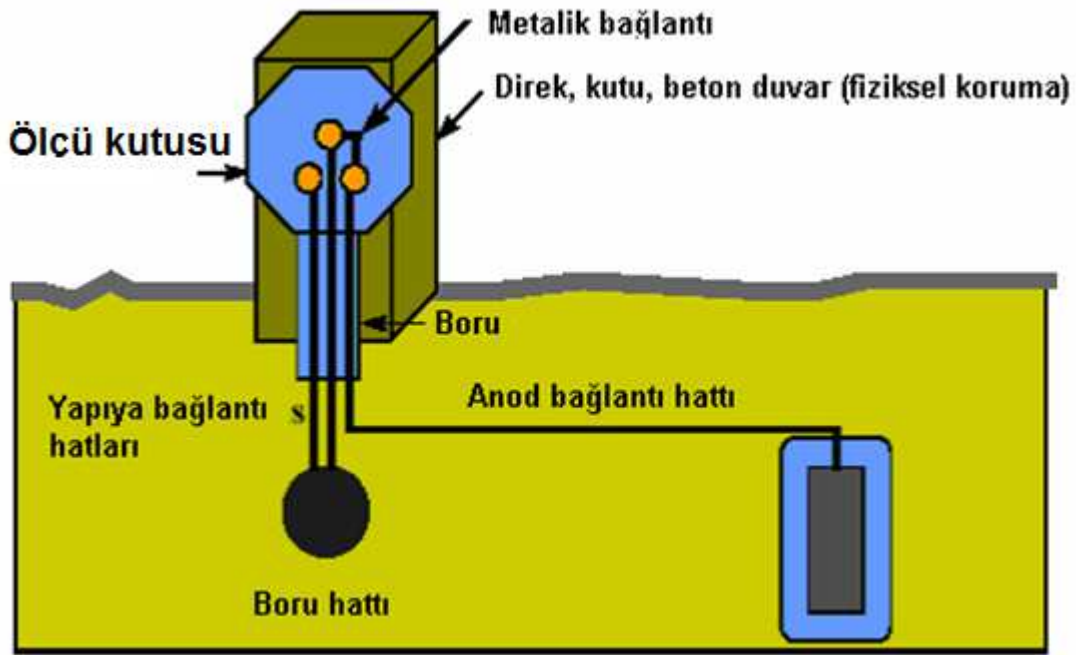
Şekil 3.16 Galvanik anotların boru seviyesi altına yerleştirilmesi

- Anotların yerleştirilmesi esnasında anot kablosunun zedelenmemesine özen gösterilmelidir. Yalıtımı zedelenmiş kablolar değiştirilmelidir.
- Anot torbaları delinmiş veya zedelenmiş olmamalıdır. Anotlar şu geçirmez torbalarının içinde olmamalıdır.
- Paketlenmiş anotlar depolama sırasında kuru halde saklanmalıdır. Galvanik anotlar anot çukurlarına yerleştirilmeden önce 48 saat torbalı bir şekilde su içine yatırılarak anot dolgu maddesinin iyice su tutması sağlanmalıdır [19].
- Anot bağlantısı termit kaynağı ile kaynatılıp bağlantı noktasının yalıtımı yapıldıktan sonra anodun monte edildiği yer su ile iyice doldurulup üzeri kapatılmalıdır. Böylece anodun montaj edildiği bölgenin nemlenmesi nedeniyle anot kısa sürede boruyu polarize edecektir.
- Birden fazla anodun bağlanması söz konusu ise anotlar paralel bağlanarak bir ana kabloda toplanır ve ölçü kutusu üzerinden katodik olarak korunan yapıya bağlanır.



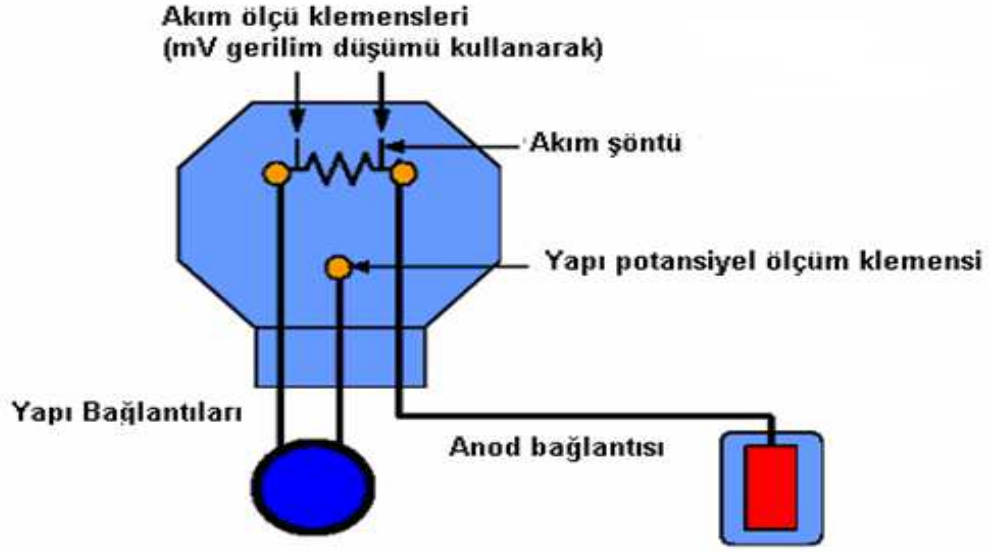
Şekil 3.17 Çok sayıda galvanik anodun yerleştirilmesi

- Galvanik anotlar yeraltına dikey yerleştirilebildiği yatay olarak da yerleştirilebilir. Bu durumda boru hattına paralel veya dikey konumda bir çukur açılarak anot dolgu malzemesinin yarısı yaklaşık 10 cm kalınlıkta tabana serilir. Bunun üzerine anotlar düzgün aralıklarla yerleştirilir ve anot kabloları ana kablo üzerine bağlanır. Anot dolgu malzemesinin kalan yarısı da anotlar üzerine yerleştirilerek çukurun üst kısmı zeminin kendi doğal toprağı ile doldurulur [11].
- Galvanik anotların çıplak kullanılması halinde açılan anot çukuru içine anot yatağı malzemesinin üçte biri koyulmalı ve anot ortalanarak kalan anot yatağı malzemesi anodun çevresine doldurularak anot sıkıştırılmalıdır.
- Gömülü yapıları korumak üzere tesis edilen galvanik anotlu katodik koruma sisteminde sistemin kontrol edilmesini sağlayan ölçü kutuları vardır. Bu ölçü kutuları ya toprak üzerinde bağlantı kutusu olarak ya da toprak yüzeyine yerleştirilirler [2].



Şekil 3.18 Toprak üzeri ölçü kutusu

- Galvanik anotlu katodik koruma sisteminin doğru bir şekilde kontrol edilebilmesi için her anot için bir ölçü kutu tesis edilmesi gerekir. Ölçü kutuları katodik koruma sistemlerinde birçok farklı testler için kullanılır.



Şekil 3.19 Ölçü kutusunun iç yapısı

3.2.1.6 Galvanik Anot Yatağı Direnci

Yeraltına konulmuş olan bir anodun direnci anot boyutları (çap ve boy) ile söz konusu zeminin özgül direncine bağlıdır. Tek anot direnci anodun dik veya yatay olarak konulmuş olduğu göz önüne alınarak “Dwight Formülleri” ile hesap edilebilir. Bu formüller $L/d > 5$ olan silindirik biçimli anotlar için kullanılır. Anotların en az anot boyu kadar derine gömülmüş olması gerekir. Çubuk biçiminde fakat dairesel kesitte olmayan anotlar için efektif çap kullanılır [11].

$$R_{dikey} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times \left(\ln \frac{8 \times L}{d} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (3.3)$$

$$R_{yatay} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times \left(\ln \frac{4 \times L}{d} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (3.4)$$

- R_{dikey} : Dik olarak yerleştirilmiş anotların zemin içindeki direnci (Ohm)
- R_{yatay} : Yatay olarak yerleştirilmiş anotların zemin içindeki direnci (Ohm)
- ρ : Zeminin elektrik özgül direnci (Ohm.cm)
- d : Anot çapı (Anot yatağı dahil (cm))
- L : Anot uzunluğu (Anot yatağı dahil) (cm)

$$R_{iç} = \frac{\rho^1}{2 \times \pi \times L^1} \times \left(\ln \frac{8 \times L^1}{d^1} - 1 \right) \text{ Ohm} \quad (3.5)$$

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

$$R_T = R_{anot} + R_{iç} \text{ (Ohm)} \quad (3.6)$$

- R_T : Toplam anot yatağı direnci (Ohm)

$$R_p = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L \times n} \times \left(\ln \frac{8 \times L}{d} - 1 + \frac{2 \times L}{L_{AA}} \ln(0,656 \times n) \right) \text{ Ohm} \quad (3.7)$$

- R_p : Paralel olarak yerleştirilmiş dik anotların zemin içindeki direnci (Ohm)
- s : Paralel anotlar arası mesafe (cm)
- n : Paralel bağlanmış anot sayısı

ÖRNEK 3.2

17 lb'lik yüksek potansiyelli paket magnezyum anodun $\rho = 2000 \text{ Ohm.cm}$ özgül direçli bir zemin içindeki dikey ve yatay gömülmesi durumları için toplam anot direncini hesaplayalım.

Çizelge 3.6'dan 17 lb'lik yüksek potansiyelli magnezyum anodun;

Çıplak boyutları: 9,4 x 9,4 x 65 cm

Paket halindeki boyutları: Çap = 16 cm, Boy = 72,5 cm

İlk olarak kare prizma biçiminde olan magnezyum anodun efektif çapını bulalım.

$$\text{Efektif çap} = 2 \times \sqrt{\frac{9,4 \times 9,4}{\pi}} = 10,62 \text{ cm}$$

Çapı ve boyu belli olan ve zemin içine dik olarak konulmuş olan anodun dolgu yatağına geçiş direncini (iç direnci) hesaplayabilmek için anot yatağı dolgu maddesinin de bilinmesi gerekir. Magnezyum anotlar için Çizelge 3.13'de verilen dolgu tiplerinden Tip A kullanılır. Aynı

çizelgeden anot yatağı dolgusunun özgül direncini 100 Ohm.cm olarak alabiliriz.

$$R_{iç} = \frac{100}{2 \times \pi \times 65} \times \left(\ln \frac{8 \times 65}{10,62} - 1 \right) = 0,71 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey gömülen galvanik anodun anot yatağı direnci,

$$R_{dikey} = \frac{2000}{2 \times \pi \times 72,5} \times \left(\ln \frac{8 \times 72,5}{16} - 1 \right) = 11,37 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey yerleştirilmiş anodun toplam yatak direnci,

$$R_T = R_{dikey} + R_{iç} = 0,71 + 11,37 = 12,08 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Yatay gömülen galvanik anodun toplam direnci ise,

$$R_{iç} = \frac{100}{2 \times \pi \times 65} \times \left(\ln \frac{4 \times 65}{10,62} - 1 \right) = 0,54 \text{ Ohm}$$

$$R_{yatay} = \frac{2000}{2 \times \pi \times 72,5} \times \left(\ln \frac{4 \times 72,5}{16} - 1 \right) = 8,33 \text{ Ohm}$$

$$R_T = R_{yatay} + R_{iç} = 0,54 + 8,33 = 8,87 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Görüldüğü üzere yatay olarak gömülen galvanik anotların toplam yatak dirençleri dikey olarak gömülenlere göre daha az olup; bir anottan çekilen akım anotların yatay olarak yerleştirilmesi durumunda artacaktır. Dolayısıyla galvanik anot ömrü azalacaktır. Katodik koruma sisteminin daha uzun bir ömre sahip olması için anotların dikey olarak yerleştirilmesi daha uygun olacaktır.

ÖRNEK 3.3

2500 Ohm.cm özgül dirençli bir zemin içerisine 4 adet 32 lb'lık yüksek potansiyelli paket magnezyum anot 4,5 m aralıklarla dikey olarak döşenecektir. Anot yatağının toplam direncini hesaplayalım.

Çizelge 3.6'dan 32 lb'lık yüksek potansiyelli magnezyum anodun;

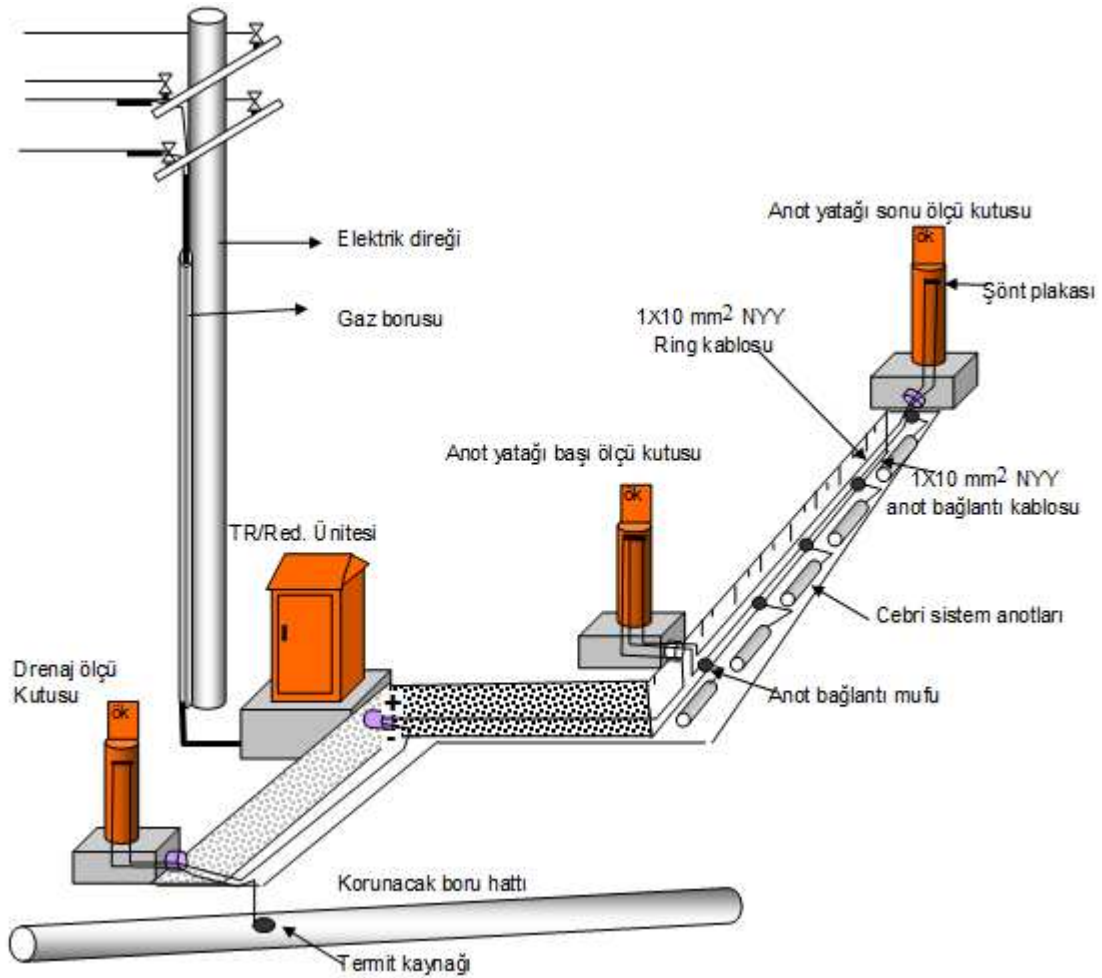
Paket halindeki boyutları: Çap = 20 cm, Boy = 70 cm

$$R_p = \frac{2500}{2 \times \pi \times 70 \times 4} \times \left(\ln \frac{8 \times 70}{20} - 1 + \frac{2 \times 70}{450} \ln(0,656 \times 4) \right) = 3,74 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

3.2.2 Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma

Bu sistemde katot reaksiyonu için gerekli elektronlar bir dış kaynaktan verilir. Bu sayede anot reaksiyonu ile elektron üretilmez ve anotta yürüyen korozyon olayı da durmuş olur.

Uygulamada bir doğru akım kaynağından alınan yeterli şiddet ve potansiyeldeki doğru akım, korunacak yapıya uygulanarak, yapı katot haline getirilir. Doğru akım genellikle bir şebekeden alınan alternatif akımın bir Transformatör/Redresör ünitesinden geçirilmesiyle elde edilir. Transformatör/Redresör ünitesinden çıkan doğru akımın (+) ucu anot yatağına, (-) ucu da korunacak olan yapıya bağlanır [11].



Şekil 3.20 Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi

Dıştan akım vererek, anot potansiyelinin açık devre potansiyeline getirilmesi şeklinde uygulanan katodik koruma sonucu metalin bütün yüzeyi aynı potansiyele ulaşır ve korozyon durur. Ancak anodun açık devre potansiyeli gerekenin üzerinde olursa kaplamalara zararlı olabilir. Bundan dolayı, uygulamada bu akım minimuma yakın tutulur. Eğer akım, korunma

için gerekli olan seviyenin altına düşerse koruma kısmi olur, yeterli olmaz [19].

3.2.2.1 Yardımcı Anotlar

Katodik koruma sistemine dış akım uygulayabilmek için yardımcı anot veya anot grupları kullanılır. Bu anotlar katodik koruma devresinden akımın kolayca geçmesini sağlamak üzere düşük dirençli olmalıdır [12].

Yardımcı anot olarak çeşitli metaller kullanılabilir. Hatta eski borular, raylar, travers gibi hurda demir ve çelik malzemeler de yardımcı anot olarak kullanılabilir. Yardımcı anotta aranan başlıca özellikler [19]:

- Yüksek bir potansiyele gerek duyulmadan istenilen akımı verebilmesi,
- Yeterli süre parçalanmadan dayanabilmesidir.

Bütün yardımcı anotlar anot tepkimeleri sonucunda az veya çok kütle kaybederler. Fakat bu kaybın makul sınırlar içerisinde olması gerekir. Yani akım başına ağırlık kaybı mümkün olduğunca az olmalıdır.

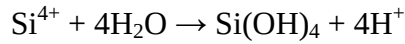
Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminde toprak altı yapılarında yardımcı anot olarak en yaygın kullanılan anot tipi silis katkılı demir anotlardır. Bu anotların dışında yurt dışından ithal edilen grafit ve metal oksit kaplı titanyum anotlar da kullanılmaktadır. Toprak altında, içinde klorür iyonu ihtiva eden su çıkması, yani iletkenliği fazla ve özgül direnci düşük olan sulu zemin içerisinde ve deniz yapılarında gümüş-kurşun anotlar kullanılmaktadır. Endüstride su altında, zemin içinde, deniz suyunda ve değişik kimyasal elektrolitler içinde kullanılmak üzere çeşitli anot tipleri geliştirilmiştir [11].

Grafit Anotlar: Grafit anotlar, ekonomik oluşları nedeniyle deniz suyu ve tatlı su içinde geniş çapta kullanılmaktadır. Zemin içerisinde kullanılması için sisteme ilave potansiyel uygulanması gerekir. Grafit anotlarda reaksiyon sonucu daima gaz çıkışı meydana geldiğinden, anotların yüzeyinde bir pasif tabaka oluşmaz ve anot pasifleşmez. Zemin ve tatlı sular içinde kullanılan grafit anot yataklarında karbon dioksit ve oksijen çıkışı meydana gelir. Deniz suyu içinde ise, esas olarak klor gazı oluşur. Yüksek akım yoğunluklarında klor yanında az miktarda oksijen ve karbondioksit gazları da çıkabilir.

Grafitin elektrot potansiyeli çeliğe göre yaklaşık olarak 1,7 Volt daha pozitifdir. Bu durumda akımsız halde grafit katot, çelik anot olacaktır. Grafitin anot haline gelmesi için katodik koruma devresine 1,7 Volt ilave bir potansiyel uygulanması gerekir [11]. Bu yüzden yeraltı

çelik yapıların korunmasında grafit anot kullanılması uygun olmayan bir yöntemdir.

Demir-Silikon Anotlar: Bileşiminde yaklaşık % 14,4 oranında silisyum içeren dökme demir anotlar inert anot olarak pratikte çokça kullanılmaktadır. Bu anotların yüzeyinde kısa sürede sağlam bir silisyum dioksit tabakası oluşur. Bu film anodun parçalanmasını önler, ancak silisyum dioksit iletken olduğu için anot direncinin artmasına neden olmaz. Saf silisyum dioksitin rezistivitesi çok yüksektir. Eğer anot yüzeyi silisyum dioksit ile kaplanırsa anot akım üretemez. Fakat anot yüzeyinde,



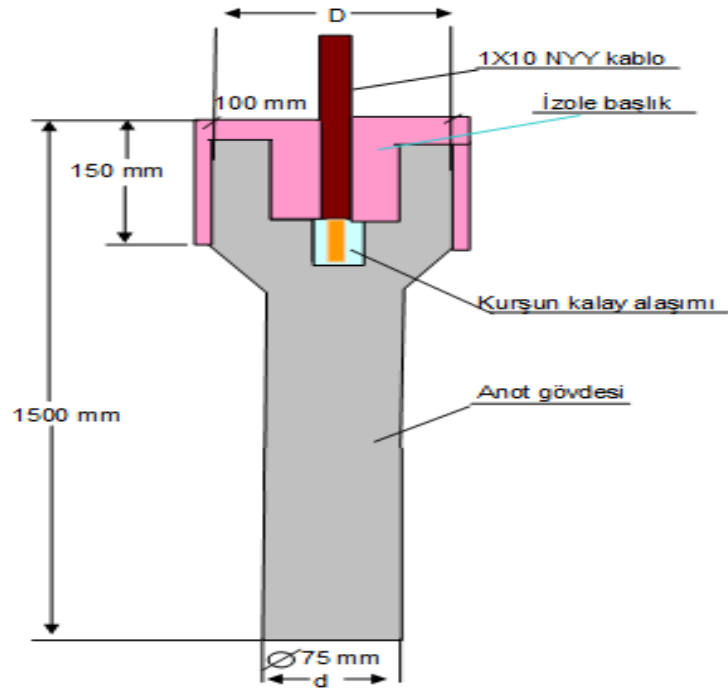
tepkimesi meydana gelir. Burada iletkenliği H^+ iyonları sağlar. Bu nedenle anot pasifleşmeden akım üretebilir. Demir silikon anot yüzeyinin tam olarak silisyum dioksit ile kaplanmasını önlemek için en uygun silisyum yüzdesi % 14,4'dür.

Demir silikon anotların en büyük dezavantajı anodun ağır ve kırılgan oluşudur. Diğer taraftan anot yatağının kuruması halinde akım çıkışında büyük ölçüde azalma meydana gelir [24].

Demir silikon anotlar zemin ve tatlı sular içinde oldukça az kütle kaybına uğrarlar. Anot kütle kaybı 0,25–1 kg/A.yıl civarındadır. Deniz suyu içinde klor gazı çıkışı nedeniyle, demir silikon anotların yüzeyindeki pasiflik bozulur. Bu durumda anot yüzeylerinde çukur tipi korozyon görülür. Bunu önlemek için anot bileşimine yaklaşık % 4,5 oranında krom ilave edilerek oluşturulan kromlu demir silikon anot (HSCI) kullanılır [11].

Çizelge 3.14 Kromlu ve kromsuz demir-silikon anotların kimyasal bileşimleri

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 3.21 100 lb (42,5 kg) demir silikon anot

Çizelge 3.15 TS-5141'e göre demir-silikon anot boyutları [12]

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

Platin Kaplanmış Titanyum Anotlar: Titanyum metali üzerine 5-10 µm kalınlığında platin kaplanarak yüksek performanslı anotlar elde edilebilir. Bu anotlardan deniz suyu içinde çok yüksek yoğunluklarda akım çekilebilir. Deniz suyu içinde 1000 A/m² olan akım çıkışı, zeminde kok tozu anot yatağı içinde 100-300 A/m² civarındadır. Platin kaplanmış titanyum (veya niobyum) anotların kütle kaybı çok azdır. Deniz suyu içinde kütle kaybı 5-10 mg/A.yıl civarındadır [11].

Platin kaplı titanyum anotlar klor çıkışına karşı dayanıklı ve akım yoğunluğu oldukça yüksektir. Fakat pahalı olmaları nedeniyle fazla tercih edilmezler.

Çizelge 3.16 Platin kaplanmış titanyum anot boyutları [11]

Anot Çapı (mm)	Anot Toplam Boyu (mm)	Kaplanmış Bölge Boyu (mm)	Kaplama Kalınlığı (µm)	Yüzey Alanı (cm ²)
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: Titanyum üzerine iletkenliği çok yüksek metal oksitler kaplanarak elde edilen anotlarda kütle kaybı yok denecek kadar azdır. Anot yüzeyi polarize olmadığı için sürekli aktif halde kalır. Bu anotlar hem zemin içerisinde hem de deniz suyunda kullanılabilir. Asitlere karşı tam dayanıklıdır [19].

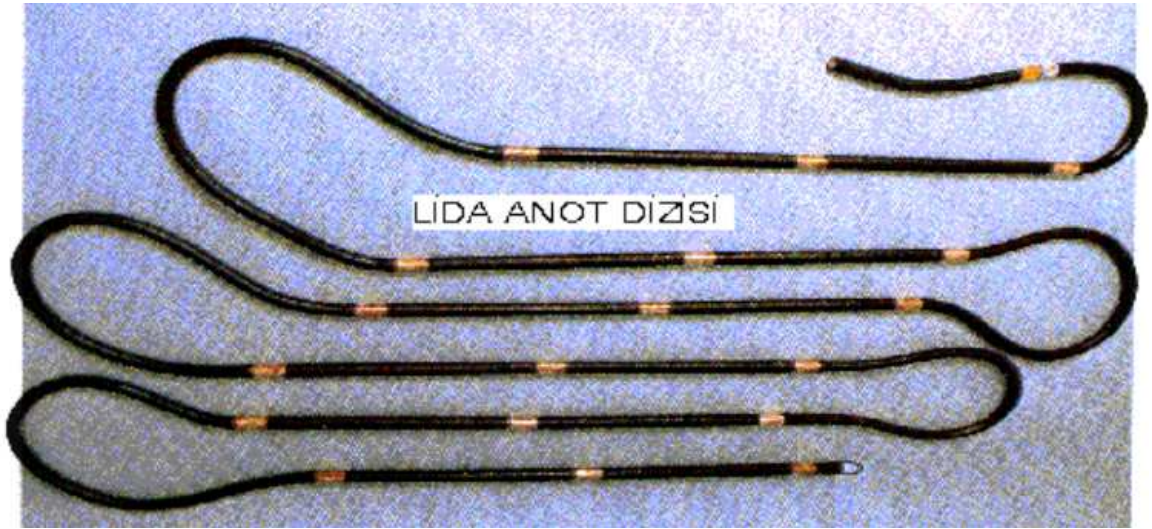
Deniz suyu içerisinde 600 A/m², zemin içinde kok tozu anot yatağı kullanılarak 100 A/m² çekilebilir. Oksit kaplı titanyum anotlarda dış akım potansiyelini fazla arttırmadan anotlardan yüksek akım çekilebilir. Böylece daha küçük boyutlu anotlar kullanarak anot yatağını küçültmek mümkün olmaktadır [11]. Örneğin demir-silikon anotlara eşdeğer olarak titanyum şerit anotlar kullanılabilir. Titanyum şerit anotların tüm yüzeyi metal oksit kaplı olmalıdır.

Metal oksit kaplı titanyum anotların çeşitli ortamlardaki akım ve kullanılabilecekleri maksimum ortam özgül direnci değerleri Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.17 Metal oksit titanyum anotların akım ve ortam özgül direnci değerleri [25]

Ortam	Akım Değeri (A/m ²)	Maksimum Dolgu* veya Ortam Özgöl Direnci (Ohm.cm)
Zemin	100 (en çok)	50
Deniz suyu	600 (en çok)	35
Çamur	50 – 100	-
Kirli ve az tuzlu su	100 – 300	-
Tatlı su	100 (en çok)	35 – 30000
*Metal oksit kaplı titanyum anotlar için kullanılan dolgu maddesi metalürjik veya kalsine petrol kokudur.		

Metal oksit kaplı titanyum anotlar tüp veya şerit olarak üretilebilmektedirler. Bir veya daha fazla aktive edilmiş titanyum tüpün tek bir kablo üzerine monte edilmesiyle LİDA dizisi elde edilir. LİDA “Lineer Dağılımlı Anot” manasına gelen bir kelimedir [25].



Şekil 3.22 LİDA anot dizisi

Farklı ortamlarda kullanılan LİDA dizisi elde etmek için kullanılan tüp anotların boyutları ve çıkış akım değerleri Çizelge 3.18’de verilmiştir.

Çizelge 3.18 Metal oksit titanyum anotların boyutları ve çıkış akımı değerleri [11]

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: Bileşiminde % 1-2 oranında gümüş içeren kurşun anotlardan deniz suyu içinde ortalama 50-200 A/m² akım çekilebilir. Bu anotların kütle kaybı başlangıçta 1 kg/A.yıl olmasına rağmen, yaklaşık 1 ay sonra 30-50 g/A.yıl değerine kadar düşer. Bunun nedeni anot yüzeyinde oluşan kurşun peroksit filmidir. Bu bileşik anodun çözünerek harcanmasını önler. Buna karşılık iyi iletken özellikte oluşu nedeniyle anot direncinde artışa neden olmaz. Fakat anottan 400 A/m² 'den fazla akım çekilecek olursa, peroksit tabakası altında kurşun klorür veya kurşun oksiklorür bileşikleri oluşabilir. Anot yüzeyinde kabarcıklar veya yumrular halinde görülen bu bileşikler iletken olmadıkları için anot akım çıkışının azalmasına neden olurlar [11].

Kurşun anotların zemin ve tatlı sular içinde kullanılması halinde anot yüzeyinde peroksit tabakası oluşmaz. Ayrıca anodun çok düşük akım yoğunluğunda çalıştırılması halinde de etkili bir peroksit tabakasının oluşması gerçekleşmez. Bu durumlarda anotta kurşun çözünerek iyon halinde çözeltiye geçer. Bu nedenle gümüş kurşun anotlar ancak deniz suyu içinde kullanılabilir. Diğer taraftan saf kurşun anotların yüzeyinde deniz suyu içinde kurşun klorür oluşması nedeniyle kısa sürede pasifleşme gözlenir. Bunu önlemek üzere anot olarak düşük yüzdeli gümüş-kurşun alaşımı kullanılır. Bu alaşım elektrolit içinde klorür yanında sülfat bulunması halinde bile pasifleşmez.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde kullanılan yardımcı anotların başlıca özellikleri Çizelge 3.19’da özetlenmiştir. Ayrıca Çizelge 3.20’de yardımcı anotlar için kullanma faktörleri ve maksimum doğru akım çıkış potansiyelleri verilmiştir.

Çizelge 3.19 Yardımcı anotların başlıca özellikleri [11]

Özellik Anot	Teorik Akım Kapasitesi (kg/A.yıl)	Özgül Direç (μOhm.cm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Kullanılma Yeri	Çekilen Maksimum Akım (A/m ²)		
					Deniz	Zemin	Tatlı Su
Platin Kaplı Titanyum	8,6.10 ⁻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	-

Çizelge 3.20 Yardımcı anotların kullanma faktörleri ve maks. DC çıkış potansiyelleri [5]

Özellik Anot	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

3.2.2.2 Yardımcı Anotların Ömrü

Galvanik anotlar gibi dış akımlı katodik koruma sistemin de kullanılan yardımcı anotlar da akım verdikçe kütlelerinden kaybederler. Fakat galvanik anotlara nazaran yardımcı anotlardaki kütle kaybı çok daha azdır. Dolayısıyla galvanik anotlara göre ömürleri daha uzundur.

Yardımcı anotların ömrünü eşitlik (3.2)'de verilen anot ömrü formülü ile hesaplamak mümkündür. Bu formüldeki eskime faktörü yerine yardımcı anotların kullanma faktörlerini ve anot verimi olarak da % 60 değerini kullanarak yardımcı anotların ömrü hesaplanabilir. Fakat bu formülle hesaplanacak ömürler çok uçuk değerlerde olacaktır. Bu uçuk ömür değerine teorik ömür denir.

Metal oksit kaplı yardımcı anotların ömrü hesaplanırken eşitlik (3.2)'deki formül yerine eşitlik (3.8) ve eşitlik (3.9)' da verilen logaritmik formüller kullanılır. Eşitlik (3.8) zemin ve tatlı sularda kullanılan anotların ömrünü eşitlik (3.9) ise deniz içinde kullanılan anotların ömrünü hesaplamak için kullanılır.

Zemin ve tatlı sularda kullanılan yardımcı anotlar için;

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 3,3 - \log(i(A/m^2)) \quad (3.8)$$

Deniz suyu içinde kullanılan yardımcı anotlar için;

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 2,3 - 0,4 \times \log(i(A/m^2)) \quad (3.9)$$

Formülde i sembolü anot akım yoğunluğunu ifade eder. Birimi A/m^2 'dir

ÖRNEK 3.4

Metal oksit kaplı titanyum anotların Çizelge 3.17'deki akım değerlerini kullanarak metal oksit kaplı titanyum anotların çeşitli ortamlarda maksimum ömürleri çizelgesini hazırlayalım.

Zemin için,

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 3,3 - \log(100) = 3,3 - 2 = 1,3 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{zemin}} = 10^{1,3} \approx 20 \text{ yıl}$$

Deniz suyu için,

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 2,3 - 0,4 \times \log(600) = 2,3 - (0,4 \times 2,8) = 1,19 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{deniz}} = 10^{1,19} \approx 15 \text{ yıl}$$

Çamur için,

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 3,3 - \log(100) = 3,3 - 2 = 1,3 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{çamur100}} = 10^{1,3} \approx 20 \text{ yıl}$$

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 3,3 - \log(50) = 3,3 - 1,7 = 1,6 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{çamur50}} = 10^{1,6} \approx 40 \text{ yıl}$$

Kirli ve az tuzlu su için,

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 2,3 - 0,4 \times \log(100) = 2,3 - (0,4 \times 2) = 1,50 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{kirli100}} = 10^{1,5} \approx 30 \text{ yıl}$$

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 2,3 - 0,4 \times \log(300) = 2,3 - (0,4 \times 2,5) = 1,3 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{kirli300}} = 10^{1,3} \approx 20 \text{ yıl}$$

Tatlı su için,

$$\log(\text{Ömür(yıl)}) = 3,3 - \log(100) = 3,3 - 2 = 1,3 \longrightarrow \text{Ömür}_{\text{tatlısu}} = 10^{1,3} \approx 20 \text{ yıl}$$

Çizelge 3.21 Metal oksit titanyum anotların akım değerine göre ömürleri

Ortam	Akım Değeri (A/m ²)	Maksimum Ömür (yıl)
Zemin	100 (en çok)	20
Deniz suyu	600 (en çok)	15
Çamur	100 – 50	20 – 40
Kirli ve az tuzlu su	300 – 100	20 – 30
Tatlı su	100 (en çok)	20

3.2.2.3 Yardımcı Anotların Montajı

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde dolgu maddesi kullanılmasının iki amacı vardır:

- Anotların toprağa geçiş dirençlerini azaltmak
- Akım sonucu meydana gelecek anot kütle kayıplarını azaltmak

Yardımcı anotların yatak dolgu maddesi olarak grafit, petrol koku ve kok kömürü tozu kullanılabilir. Bunların içerisinde en fazla kullanılanı ve en etkili olanı kok tozudur.

Kok tozu % 10 oranında sönmemiş kireç içerir. Özgül direnci en fazla 50 Ohm.cm olmalıdır. Kullanılan kok tozunun tane çapı en fazla 10 mm olmalıdır. Titanyum şerit anotlar kullanılacaksa temas yüzeyini arttırmak için kok tozunun tane çapı en fazla 2 mm olmalıdır. Titanyum anotlarda kok tozu, anoda yakın iç kısımlara ince taneli dış kısımlara ise daha iri taneli olmak üzere kademeli olarak da kullanılabilir [19].

Kok tozunun özellikleri Çizelge 3.22’de verilmiştir [11].

Çizelge 3.22 Yardımcı anot yatağı dolgu maddesi olarak kullanılan kok tozu

Kok Tozunun Özellikleri	Sınır Değerler
100 nolu elekten geçen	En çok % 5
Maksimum tane çapı	10 mm
Uçucu organik maddeler	En çok % 3
Özgül elektrik direnci	50 Ohm.cm
Kütle kaybı	En çok 0,1 kg/A.yıl
Rutubet	% 10 - % 15
Yoğunluk	0,7 – 0,8 kg/litre
Kül	En çok % 20

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde yardımcı anodun ve anot dolgu maddesinin yerleştirileceği anot yataklarının seçiminde aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır [19]:

- Anot yatağı olarak seçeceğimiz yerin özgül direnç değeri düşük olmalıdır.
- Yeter sayıda anodun montajı için kazı yapacak alan bulunmalı ve bu alanda kazı yaparken üçüncü şahıslarla ilgili sorun bulunmamalıdır.
- Dış akımlı korumada şebeke enerjisine ihtiyaç bulunduğundan emniyetli bir elektrik şebekesinin yanında bulunmalıdır.

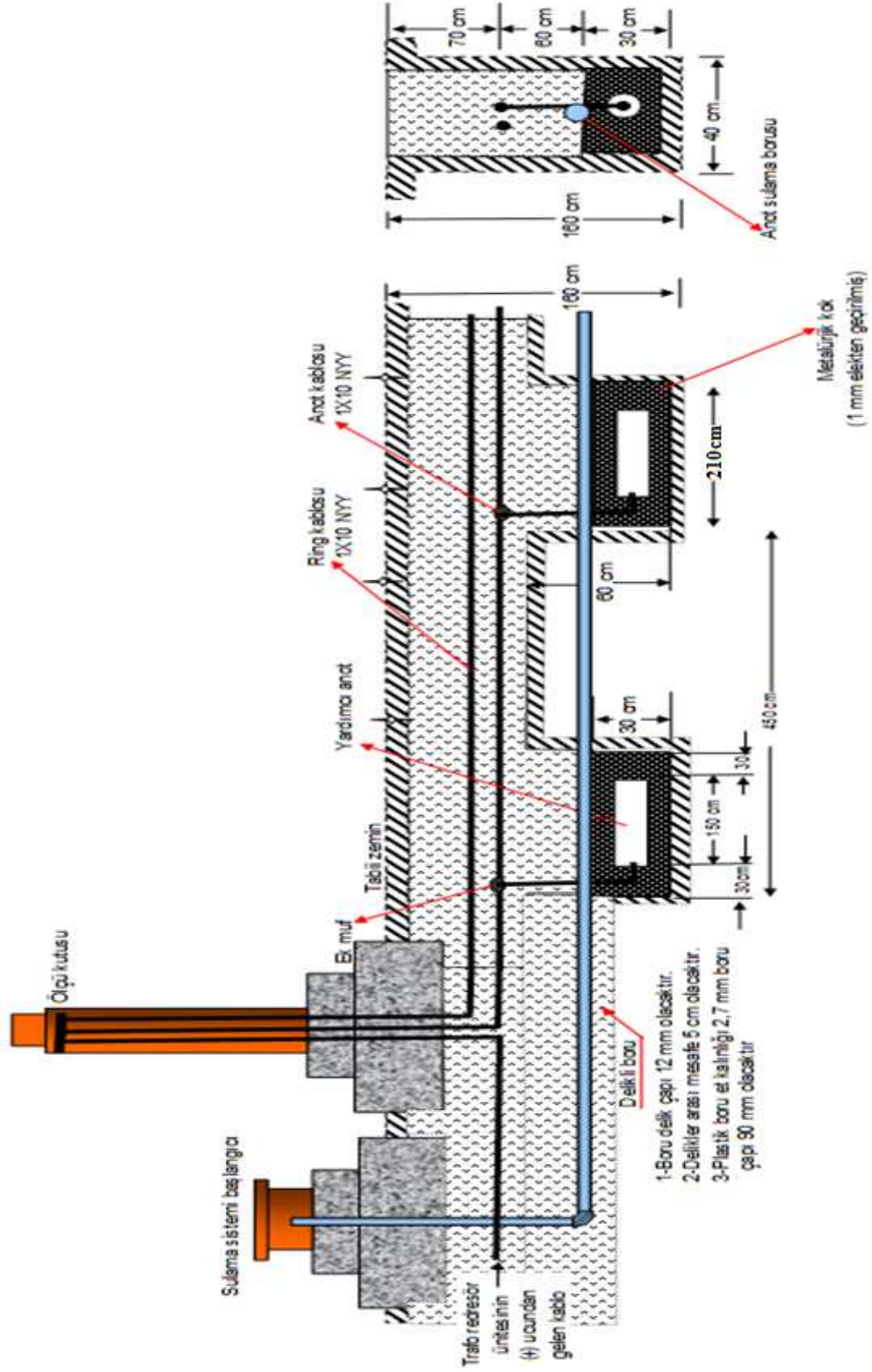
- Yazın kurak dönemlerinde anot yatağının kuruması nedeniyle zaman zaman sulama yapmak gerektiğinde söz konusu suyun temini kolay olmalıdır.
- Anot yatağı yakınında kaçak akım korozyonuna neden olacak metalik yapının bulunmaması gereklidir.
- Dış akımlı sistemde trafo redresör ünitesi zaman zaman arıza yapma ihtimali bulunduğundan kolayca ulaşılabilecek noktaya monte edilmelidir.
- İşletmeciye yakın bir noktada olması halinde başlangıç ayarlarının bozulup bozulmadığı işletmeci tarafından daha sık kontrol edilebilir.
- Karda kışta her zaman ulaşılabilecek noktada olmalıdır.
- TS 5141 standardına göre anotlar korunacak metalik yapılardan en az 30 m uzağa ve birbirlerine en az 3 m mesafede aralıklarla yerleştirilmelidir [12].
- Genel kaide olarak ise yardımcı anot yatağı korunacak olan yapıdan en az 50 m, en fazla 100 m uzaklıkta olmalıdır [16].

Bu hususlara göre seçilen yere sığ veya derin kuyu anot yatakları açılır.

Sığ Anot Yatakları:

Sığ anot yatakları için geniş bir alan kullanılır. Anot yatağı yapılmış olan bir arazinin başka amaçlar için kullanılması mümkün değildir. İdeal olarak toprak özgül direncinin yaklaşık 1000 Ohm.cm olduğu yerlere sığ anot yataklarının açılması istenir [16].

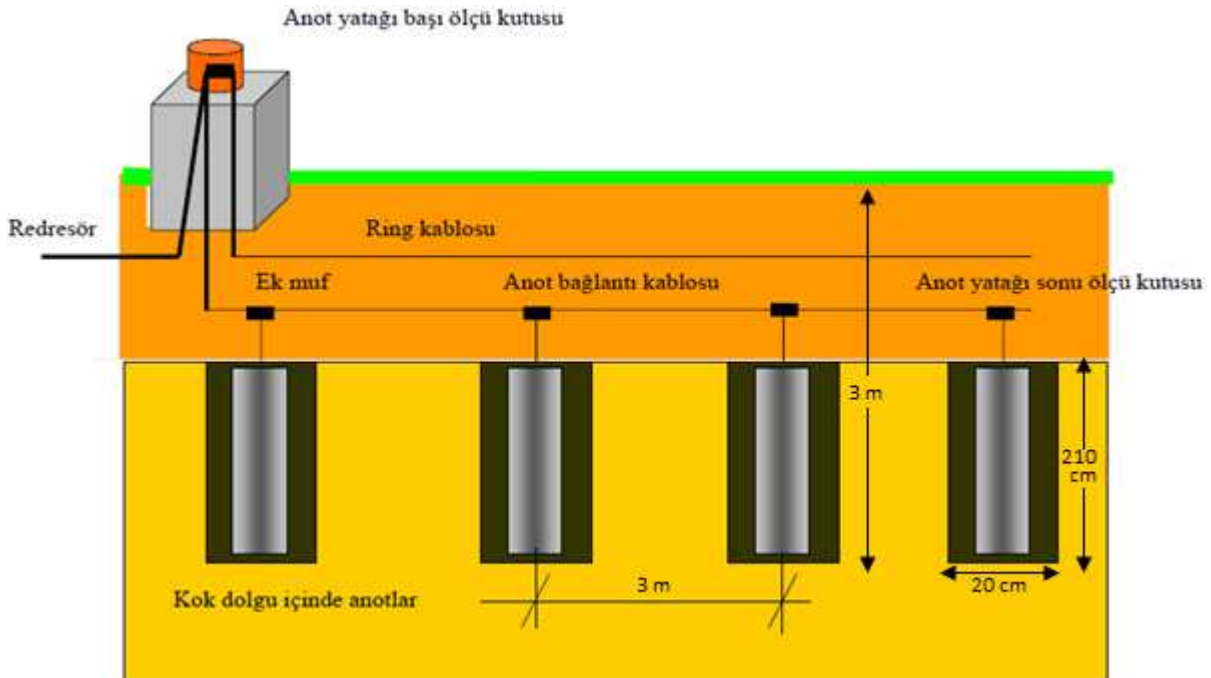
Sığ anot yataklarına anotları yatay veya dikey olarak yerleştirmek mümkündür. Eğer anotlar yatay olarak döşenecekse anotlar arasındaki açıklık 4,5 metre olarak alınır. Sığ yataklar makine ile kolaylıkla açılması nedeniyle yeterli boş arazinin bulunduğu yerlerde en çok tercih edilen yatak türüdür. Anotların sığ yataklara yatay olarak döşenme şekilleri ve ara mesafeleri Şekil 3.23’de gösterilmiştir [19].



Şekil 3.23 Yardımcı anotların sığ anot yataklarına yatay yerleştirilmesi

Anotlar akım verdikçe zamanla anot yatağı kurumakta ve dolayısıyla anotlardan akım çıkışı azalmaktadır. Bunu önlemek için önceleri anot yatağının üzeri açılarak sulanmakta ve tekrar kapatılmaktaydı. Bu da katodik koruma sisteminin işletme maliyetini arttıran bir faktördü. Son uygulamalarda ise Şekil 3.23’de de gösterildiği gibi anot dolgusunun üzerine delikli boru yerleştirilmekte ve bu borudan sulama yapılarak anot yatağının kuruması engellenmektedir. Böylece anotlardan akım çıkışının sulamasız bir sisteme göre daha fazla olması sağlanır.

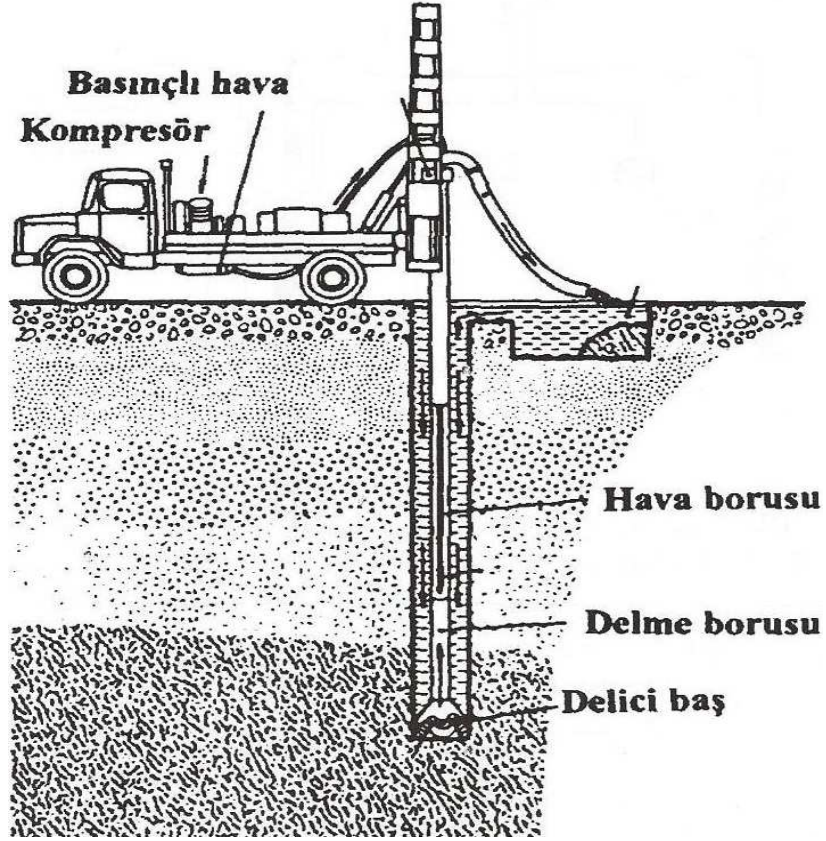
Yardımcı anotlar sıg anot yataklarına Şekil 3.23’de görüldüğü gibi yatay döşendiği gibi Şekil 3.24’deki gibi dikey olarak da döşenebilir. Bu iki yöntem de ülkemizde uygulanmaktadır. Anotların yatay döşenmesi işi yapan açısından kolay bir uygulamadır. Sistemde sulama tesisatı varsa yatay döşenmiş anotların bulunduğu sıg anot yataklarında sulamanın etkisi daha hızlıdır. Ancak anotlar arası mesafe 4,5 metre olması nedeniyle yatay döşenen anot yataklarında daha geniş bir alana ihtiyaç vardır. Anotların sıg anot yatağına dikey döşenmesi durumunda ise anotlar arası mesafe 3 metreye düştüğünden alandan tasarruf sağlanabilir. Ayrıca anotlar daha derine monte edildiği için yeraltının neminden yararlanma imkânı yatay döşeme yapılmış yataklara göre daha fazladır. Fakat yatay döşemeye göre daha fazla kazı ve dolgu yapılacağı için yapım maliyetini artırıcı bir durum söz konusudur. Bunun için genelde anotların sıg anot yataklarına yatay olarak gömülmesi tercih edilir [19].



Şekil 3.24 Yardımcı anotların sıg anot yataklarına dikey yerleştirilmesi

Derin kuyu anot yatakları:

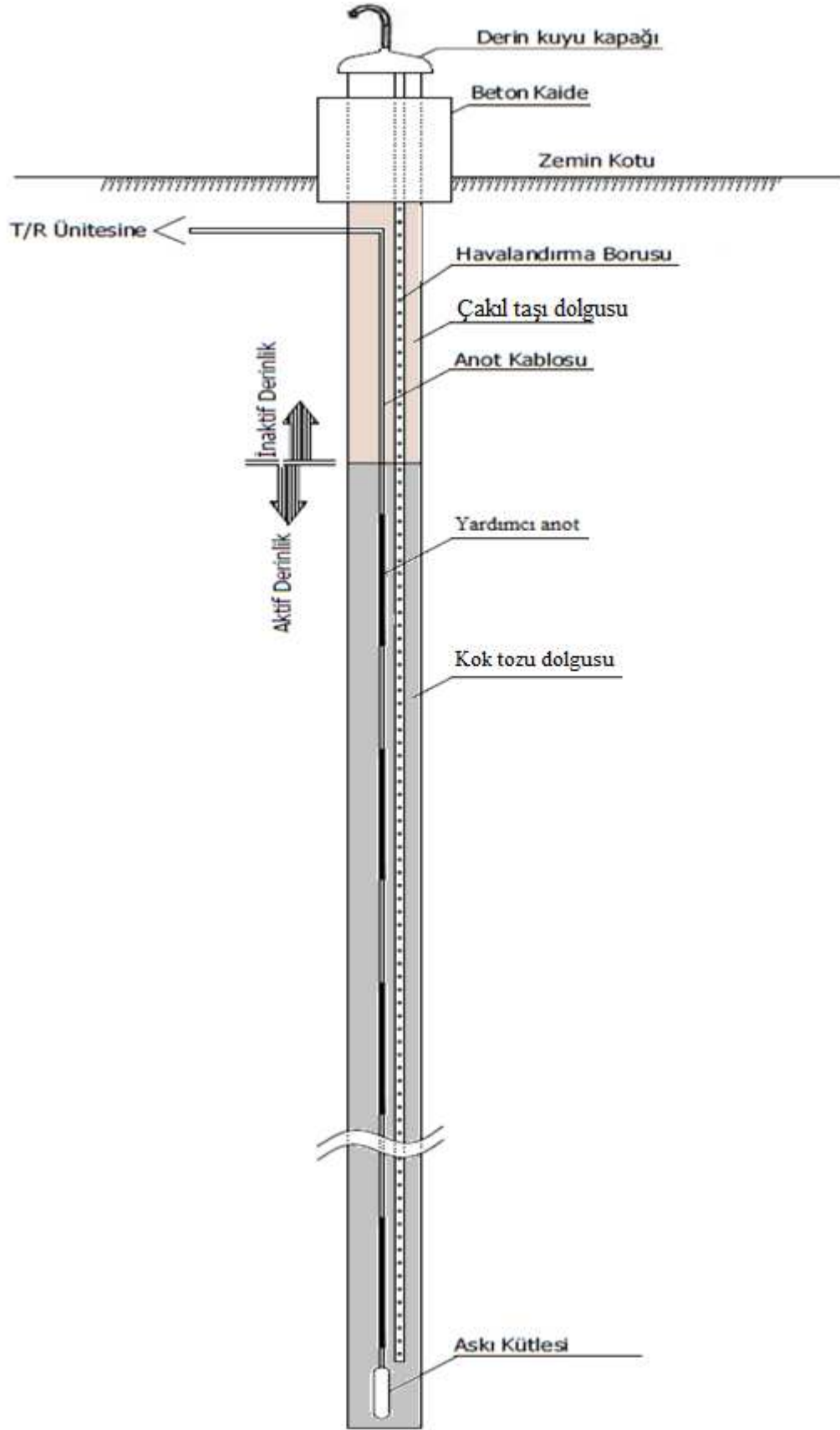
Derin kuyu anot yataklarının açılmasında hava basınçlı ya da sulu sondaj makineleri kullanılır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Sondaj makinesi ile derin kuyu açılması

Yardımcı anotlar derin kuyu anot yataklarına 40–50 metre boyunda kuyular açılarak kuyu içine dikey olarak monte edilirler. Kuyuların boyu ihtiyaç olan anot sayısına göre daha da artabilir. Kuyular 22–30 cm çapında açılır [19].

Derin kuyu anot yataklarında klor gazı açığa çıkmaktadır. Gaz çıkışını sağlamak için 2–3 cm çapında PVC esaslı bir havalandırma borusu kullanılmalıdır (Şekil 3.26). Bu boru gazı dışarı atabilecek kadar büyük, dolgu malzemesinin boru içine dolmasını engelleyecek kadar küçük çaplı deliklere sahip olmalıdır. Havalandırma borusu aynı zamanda anot taşıyıcı boru (keson) olarak da kullanılabilir [11].



Şekil 3.26 Derin kuyu anot yatağı

Derin kuyu anot yataklarında anot dolgu maddesi olarak genelde kok tozu kullanılır. Kok tozu kuyu içerisine doldurulurken arada boşluk kalmamalıdır. Bunu sağlamak için kuyu içerisindeki su tamamen boşaltılmalıdır. Daha sonra kok tozu, deterjan gibi maddelerle karıştırılarak akışkan hale getirilip pompa ile kuyu dibinden itibaren doldurulmalıdır. Ölçü olarak 90 kg kok tozu içerisine 0,5 kg deterjan ve yeteri miktarda su katılarak 100 litrelik akışkan kıvamlı bir kok tozu çamuru elde edilebilir [11]. Derin kuyu içinde yalnızca anotların olduğu bölüme kok tozu dolgusu doldurulmalıdır. Anotların ve kok tozu dolgu maddesinin bulunduğu bu bölüme aktif derinlik bölümü adı verilir. Derin kuyunun kok dolgu maddesinin üst seviyesinden itibaren çakıl taşı ile doldurulan bölümüne ise inaktif derinlik bölümü denir.

Derin kuyularda kullanılan anot kabloları özel tip kablolardır. Kuyu içerisinde klor gazı çıkışı olacağından kullanılacak olan anot kablosu neopren, teflon ve silikon gibi klora dayanıklı malzemelerle kaplanmalıdır. Anot kabloları yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE) veya kloro-trifloro etilen (ECTFE) plastikleri ile kaplanmış olmalıdır. Piyasada EPR/CSPE tipi kablo ve PVDF/HMWPE tipi kablolar derin kuyu anot yatakları için en fazla kullanılan kablo tipleridir. Bu tip kabloların en az 16 mm² kesitli olması istenir.

Derin kuyularda titanyum zincir veya şerit anotlar demir-silikon anotlara nazaran daha hafif olmaları ve kütle kayıplarının çok daha az olması nedeniyle daha çok kullanılırlar [19].

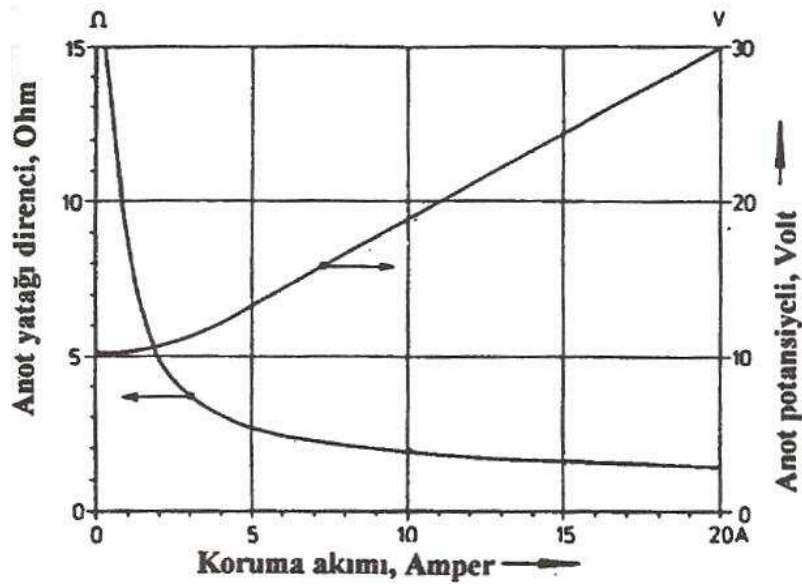
Derin kuyu anot yataklarının başlıca avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Derin kuyu anot yataklarında, akım yerin altından katodik korunacak yapıya iletiildiği için kaçak akım etkileri yok denecek kadar azdır.
- Yerin altında nem oranının daha yüksek olması trafo redresör ünitesinin daha randımanlı çalışmasını sağlar.
- Şehir içinde kazı yapacak alanın bulunamayışı, şehir trafiğinin kazı yapmaya müsaade etmemesi, şehir içindeki metalik yapıların çok olması, metalik yapıların tespitinin güç olması gibi olumsuz şartlarda katodik koruma yapılabilmesini sağlar.
- Zemin özgül direncinin çok yüksek olduğu kurak bölgelerde anot yatağı direncini istenen seviyeye düşürülebilir. Donma, kuraklık gibi çevre faktörlerinden anotların etkilenmemesini sağlayarak sığ anot yataklarına göre daha üniform akım dağılımı sağlar.
- Maliyetleri sığ yataklara oranla çok daha fazladır. Ayrıca montajı ve tamir edilmesi zordur.

3.2.2.4 Yardımcı Anot Yatağının Direnci

İmal edilecek sığ veya derin kuyu anot yataklarının direncinin mümkün olduğunca düşük olması ve zamanla artmaması gerekir. Eğer anot yatağı direnci yüksek olursa katodik koruma akımını sağlamak için yüksek bir potansiyel uygulanması gerekir. Yüksek potansiyel kullanılması ise akım maliyetini artırır. Anot yatağı direncini azaltmak amacıyla aşağıdaki tedbirler alınabilir:

- Anot yatağı düşük özgül dirençli zemin içinde açılmalıdır.
- Paralel bağlanmış anotlar arası mesafe arttırılabilir. Fakat yer sıkıntısı olan yerlerde bunu uygulamak kolay olmayabilir.
- Paralel bağlı anot sayısı arttırılabilir. Fakat bu durumda yapım maliyeti artacaktır.
- Anot çevresinde kok tozu dolgusu kullanılarak anodun geçiş direncini azaltmak mümkündür.
- Boy/çap oranı daha büyük olan anotlar tercih edilebilir.
- Anot yatağı direncinin katodik koruma akım ihtiyacına göre olması gereken üst sınırı belirlenmelidir. Bunun için 10000 Ohm.cm zemin özgül direnci için hazırlanmış Şekil 3.27'deki grafik kullanılabilir.



Şekil 3.27 Yardımcı anotların ekonomik yatak direnci sınırını belirleme grafiği

Şelik 3.27' de görüldüğü gibi katodik koruma akım ihtiyacının 2 Amper değerinden az olması halinde anot yatağı direnci 5 Ohm ve üzeri seçilebilir. Ancak katodik koruma akım ihtiyacının 5 Amper ve üzeri bir değerde olması halinde ise anot yatağı direncinin 2 Ohm değerinden düşük olması istenir. İdeal olarak ise anot yatağı direncinin 1 Ohm olması istenir. Bu dirençteki bir anot yatağından anot akımları rahatlıkla toprağa geçerek katodik korunacak yapı ile arasındaki devreyi tamamlar.

ÖRNEK 3.5

Anot yatağından 15 A çekilecek olan bir dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi için anot yatağı direncinin ekonomik olarak tavsiye edilen üst sınırını 4000 Ohm.cm özgül dirence sahip bir zemin için hesaplayalım.

Şekil 3.27'deki grafikten 15 A için anot yatağı direnci üst sınır değeri yaklaşık olarak 1,6 Ohm olarak okunur.

Bu değer 10000 Ohm.cm özgül direncine sahip zemin için üst sınır olup, bu değeri eşitlik (3.10)'da formülü verilen düzeltme faktörü ile çarparak istenilen özgül dirençteki üst sınır değerini bulabiliriz.

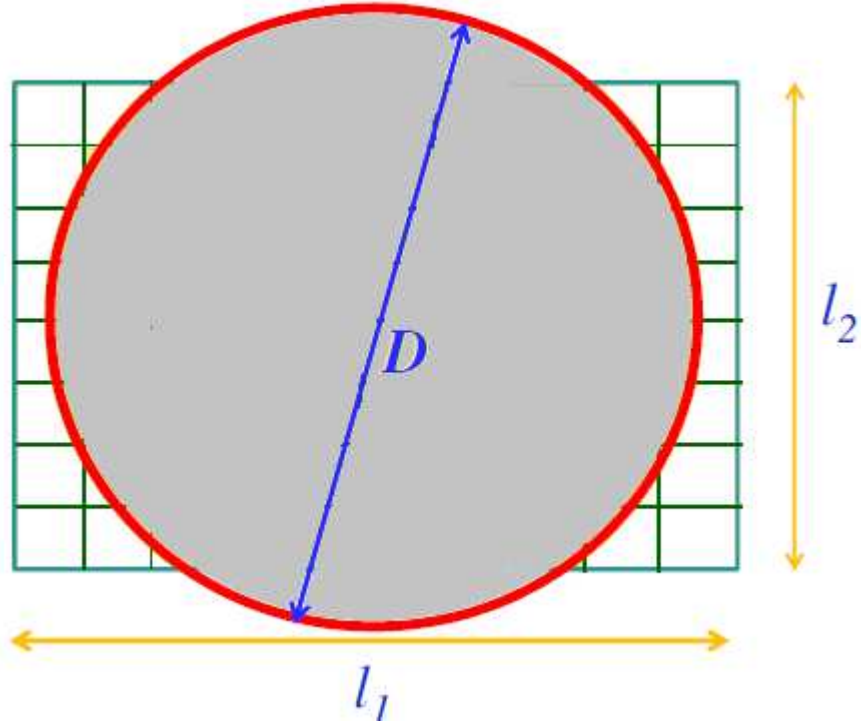
$$F = \sqrt{\frac{\rho}{10000}} \quad (3.10)$$

$$F = \sqrt{\frac{4000}{10000}} = 0,63 \text{ olarak bulunur.}$$

R= Anot yatağı direnci= 1,6×0,63= 1,01 Ohm olarak bulunur. Yani R < 1,01 Ohm olmalıdır.

Anot yatağının belirlenmesi için tek anodun direncinin bilinmesi gerekir. Anot direncini galvanik anotların direncinin de hesaplanmasında kullanılan Dwight formülleri ile hesaplamak mümkündür. Dwight formülleri anot boyunun anot çapına oranının 5'ten büyük olduğu silindir biçimli veya çubuk biçiminde anotlar için geçerli olup; dairesel kesiti olmayan anotlar için bu formüllerde efektif çap kullanılır. Efektif çap hesabı eşitlik (3.11)'de verilmiştir (Şekil 3.28).

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{\text{Kesit alanı}}{\pi}} \quad (3.11)$$



Şekil 3.28 l_1 ve l_2 uzunluklarına sahip dikdörtgenin alanına eşdeğer dairenin çapı

ÖRNEK 3.6

Ortalama özgül direnci 1750 Ohm.cm olan bir zemin içerisine 5 cm çapında ve 150 cm boyunda bir demir-silikon anodun dik ve yatay olarak döşenmesi şartları için anot yatağı toplam direncini hesaplayalım. (Anot yatağı için kok tozu dolgu maddesi kullanılacak olup kok tozunun özgül direnci 50 Ohm.cm alınacaktır. Dolgulu halde anot yatağı, boyutları sırasıyla boy, yükseklik, en olarak 210 cm, 30 cm, 40 cm olan sıg anot yatağıdır.)

Anot yatağı efektif çapı D;

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{30 \times 40}{\pi}} \cong 39 \text{ cm olarak bulunur.}$$

Dik olarak yerleşilmiş anotlar için Dwight formüllerini kullanıp anot yatağı direncini bulalım.

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \times \left(\ln \frac{8 \times 150}{5} - 1 \right) = 0,24 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

$$R_{dikey} = \frac{1750}{2 \times \pi \times 210} \times \left(\ln \frac{8 \times 210}{39} - 1 \right) = 3,67 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dik anot yatağı toplam direnci,

$R_T = R_{dikey} + R_{iç} = 0,24 + 3,67 = 3,91$ Ohm olarak bulunur.

Yatay gömülen yardımcı anot yatağının toplam direnci ise,

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \times \left(\ln \frac{4 \times 150}{5} - 1 \right) = 0,20 \text{ Ohm}$$

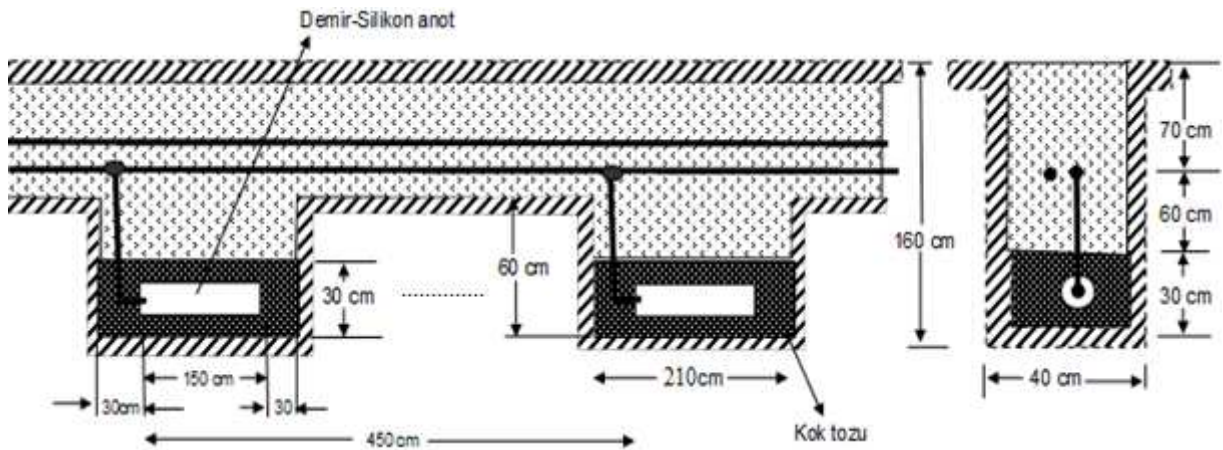
$$R_{yatay} = \frac{1750}{2 \times \pi \times 210} \times \left(\ln \frac{4 \times 210}{39} - 1 \right) = 2,75 \text{ Ohm}$$

$R_T = R_{yatay} + R_{iç} = 0,20 + 2,75 = 2,95$ Ohm olarak bulunur.

Görüldüğü üzere yatay olarak gömülen yardımcı anotların toplam anot yatağı dirençleri dikey olarak gömülenlere göre daha azdır. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde yeteri kadar boş arazinin olduğu durumlarda sıkı anot yataklarına anotları yatay olarak yerleştirmek en fazla başvurulan yöntemdir.

ÖRNEK 3.7

Kesit görünüşü Şekil 3.29' daki gibi olan sıkı bir anot yatağına 160 cm derinliğe 150 cm boyunda ve 5 cm çapında 5 adet demir-silikon anot 450 cm aralıklarla yerleştirilecektir. Anotların yatay yerleştirilmeleri durumları için toplam anot yatağı direncini hesaplayalım. (Zemin özgül direnci= 2200 Ohm.cm ve anot yatağı için kok tozu dolgu maddesi kullanılacak olup kok tozunun özgül direnci 50 Ohm.cm alınacaktır. Dolgulu halde anot yatağı, boyutları sırasıyla boy, yükseklik, en olarak 210 cm, 30 cm, 40 cm olan sıkı anot yatağıdır.)



Şekil 3.29 Yatay olarak yerleştirilmiş anotların sıkı anot yatağının kesit görünüşü

Anot yatağı efektif çapı D;

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{30 \times 40}{\pi}} \cong 39 \text{ cm olarak bulunur.}$$

Yardımcı anotların paralel döşenmesi halinde hesaplamalara interferans faktörlerinin de katılması gerekir. İnterferans faktörünü (3.12) eşitliği ile hesaplayabiliriz.

$$F_A = 1 + \frac{\rho}{\pi \times L_{AA} \times R_T} \times \ln(0,656 \times n) \quad (3.12)$$

- F_A : İnterferans faktörü
- ρ : Zemin özgül direnci (Ohm.cm)
- L_{AA} : Anotlar arası uçtan uca mesafe (cm)
- R_T : Tek anodun toplam direnci
- n : Paralel bağlı anot sayısı

Yatay gömülen yardımcı anot yatağının toplam direnci ise,

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \times \left(\ln \frac{4 \times 150}{5} - 1 \right) = 0,20 \text{ Ohm}$$

$$R_{yatay} = \frac{2200}{2 \times \pi \times 210} \times \left(\ln \frac{4 \times 210}{39} - 1 \right) = 3,53 \text{ Ohm}$$

$$R_T = R_{yatay} + R_{iç} = 0,20 + 3,53 = 3,73 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Yatay olarak döşenmiş anotlar için anotlar arası uçtan uca mesafe eşitlik (3.13) ile hesaplanır.

$$L_{AA} = (\text{Anotlar arası mesafe} - \text{Anot boyu}) \quad (3.13)$$

$$L_{AA} = 450 - 150 = 300 \text{ cm}$$

$$F_A = 1 + \frac{2200}{\pi \times 300 \times 3,73} \cdot \ln(0,656 \cdot 5) = 1,74 \text{ olarak bulunur.}$$

Yatay olarak yerleştirilmiş n adet demir-silikon anodun toplam eşdeğer direnci;

$$R_{eş} = \left(\frac{R_{yatay} + R_{iç}}{n} \right) \times F_A \quad (3.14)$$

formülü ile hesaplanabilir.

$$R_{eş} = \frac{3,53 + 0,20}{5} \times 1,74 = 1,3 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikkat edilirse eşitlik (3.4)'de anotların gömüldüğü derinlik hiç hesaba katılmamıştır. Anotların derinliğinin de hesaba katıldığı eşitlik (3.15) ile daha sağlıklı bir direnç hesabı yapmak mümkündür.

$$R_{iç,yatay} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \left[\ln \left(\frac{4 \times L^2 + 4 \times L \sqrt{(2 \times H)^2 + L^2}}{D \times (2 \times H)} \right) + \left(\frac{(2 \times H)}{L} - \frac{\sqrt{(2 \times H)^2 + L^2}}{L} - 1 \right) \right] \quad (3.15)$$

- $R_{iç,yatay}$: Yatay anodun iç direnci, yatay dolgunun direnci (Ohm)
- ρ : Anot için dolgu özgül direnci, dolgu için zemin özgül direnci (Ohm.cm)
- L : Anot boyu, dolgu boyu (cm)
- H : Anodun gömülme derinliği (cm)
- D : Anot çapı, Dolgunun efektif çapı (cm)

Yatay olarak yerleştirilmiş demir-silikon anot yatağının toplam direncini (3.15) eşitliğini kullanarak bulalım.

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \left[\ln \left(\frac{4 \times 150^2 + 4 \times 150 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 150^2}}{5 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{150} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 150^2}}{150} - 1 \right) \right]$$

$R_{iç} = 0,21 \text{ Ohm olarak bulunur.}$

$$R_{yatay} = \frac{2200}{2 \times \pi \times 210} \left[\ln \left(\frac{4 \times 210^2 + 4 \times 210 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 210^2}}{39 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{210} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 210^2}}{210} - 1 \right) \right]$$

$R_{yatay} = 3,98 \text{ Ohm olarak bulunur.}$

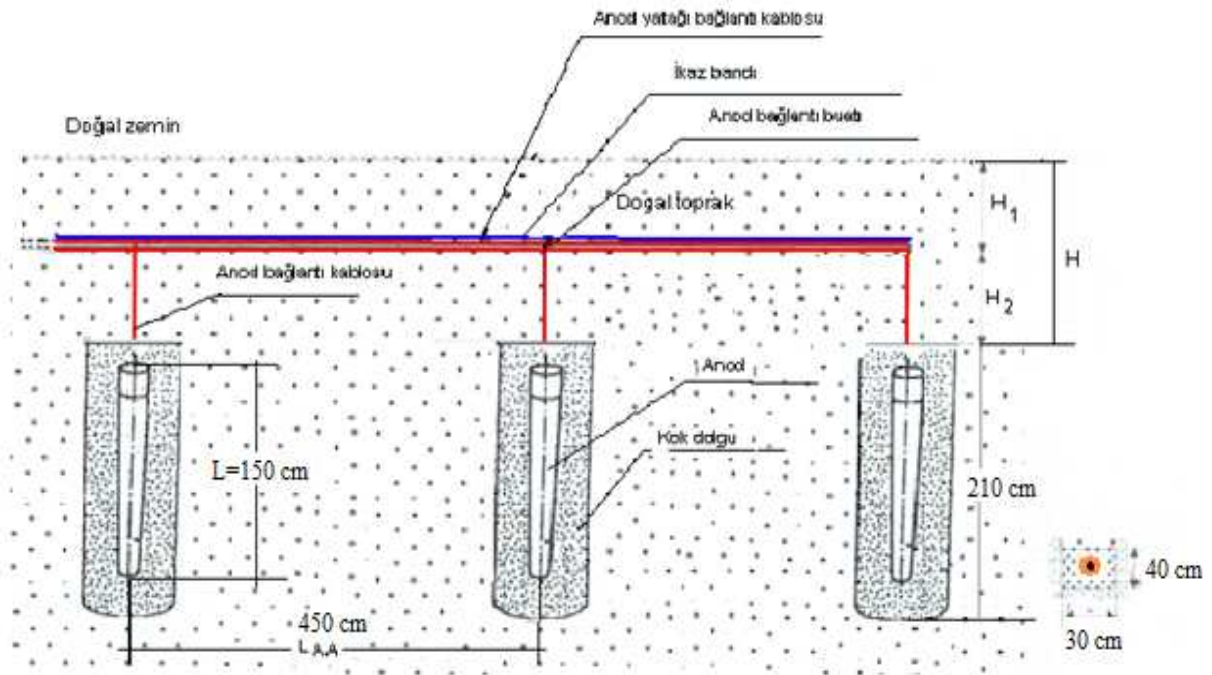
$$R_T = R_{yatay} + R_{iç} = 0,21 + 3,98 = 4,19 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

$$F_A = 1 + \frac{2200}{\pi \times 300 \times 4,19} \times \ln(0,656 \times 5) = 1,66 \text{ olarak bulunur.}$$

$$R_{eş} = \left(\frac{3,98 + 0,21}{5} \right) \times 1,66 = 1,4 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

ÖRNEK 3.8

Örnek 3.29’de verilen anot ve anot yatağı boyutları aynı olmak üzere anotlar sıg anot yatağına Şekil 3.30’daki gibi dikey olarak yerleştirilmesi durumu için toplam anot yatağı direncini hesaplayalım.



Şekil 3.30 Dikey olarak yerleştirilmiş anotların sıg anot yatağının kesit görünüşü

Anot yatağı efektif çapı D;

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{30 \times 40}{\pi}} \cong 39 \text{ cm olarak bulunur.}$$

Dikey gömülen yardımcı anotların anot yatağının toplam direnci ise,

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \left(\ln \frac{8 \times 150}{5} - 1 \right) = 0,24 \text{ Ohm}$$

$$R_{dikey} = \frac{2200}{2 \times \pi \times 210} \left(\ln \frac{8 \times 210}{39} - 1 \right) = 6,28 \text{ Ohm}$$

$R_T = R_{dikey} + R_{iç} = 6,28 + 0,24 = 6,52$ Ohm olarak bulunur.

Dikey döşenmiş anotlar için $L_{AA} = 450$ cm olarak alınır.

Yardımcı anotların paralel döşenmesi halinde hesaplamalara interferans faktörlerinin de katılması gerekir. İnterferans faktörünü (3.12) eşitliği ile hesaplayabiliriz.

$$F_A = 1 + \frac{2200}{\pi \times 450 \times 6,52} \times \ln(0,656 \times 5) = 1,28 \text{ olarak bulunur.}$$

$$R_{eş} = \left(\frac{6,28 + 0,24}{5} \right) \times 1,28 = 1,7 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey yerleştirilmiş anotlar için interferans faktörü hesabını ayrı olarak yapmadan daha pratik olarak toplam anot yatağı direncini hesaplayabileceğimiz eşitlik (3.7) kullanılabilir.

$$R_{eş\ dikey} = \frac{2200}{2 \times \pi \times 210 \times 5} \left(\ln \frac{8 \times 210}{39} - 1 + \frac{2 \times 210}{450} \ln(0,656 \times 5) \right) = 1,34 \text{ Ohm}$$

$$R_{eş\ iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150 \times 5} \left(\ln \frac{8 \times 150}{5} - 1 + \frac{2 \times 150}{450} \ln(0,656 \times 5) \right) = 0,06 \text{ Ohm}$$

$$R_{eş} = 1,34 + 0,06 = 1,4 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dış akımlı katodik koruma sistemlerinde katodik koruma sisteminin toplam direncini oluşturan dirençler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

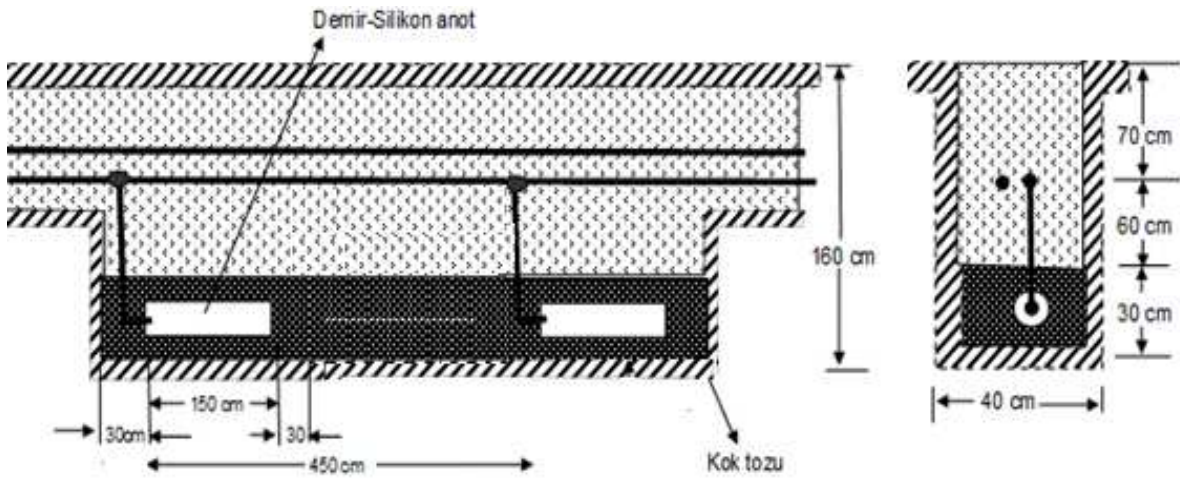
- T/R Ünitesi-Boru arasındaki kablo direnci
- T/R Ünitesi-Anot yatağı arasındaki kablo direnci
- Yardımcı anot yatağı direnci
- Boru kaplamasının direnci

Bu dirençlerden kabloların ve boru kaplamasının direnci toplam direnç içerisinde fazla bir değer ifade etmez. Önemli olan direnç anot yatağı direncidir. Katodik koruma sisteminin toplam direncinin ideal olarak en fazla 1 Ohm değerinde olması istenir. Kaplama ve kablo dirençleri ihmal edildiğinde ise anot yatağı direncinin 1 Ohm ve altında bir değerde olması gerekir. Anot yatağı direncini mümkün olduğu kadar düşürmek için aşağıda belirtilen kimyasal ve elektriksel önlemlerin alınması gerekir:

- Anot yatağı tabanı su tutucu bir kil tabakası ile sıvanabilir.
- Anot yatağı sulama tesisatı kullanarak anot yatağının nemlendirilmesi sağlanabilir.
- Bağlantılarda uygun kesitte kablo kullanılmalıdır.
- Anot yatağı dolgu maddesi olarak kullanılan kok tozu miktarı artırılmalı, sadece anotların etrafında değil anotlar arasında da kullanılmalıdır.
- Tüm tedbirlere rağmen anot yatağı direnci düşürülemiyorsa anot sayısı artırılmalıdır.

ÖRNEK 3.9

Örnek 3.7'deki değerleri kullanarak 5 adet demir-silikon anodun üniform bir kok tozu yatağına Şekil 3.31'deki gibi yatay olarak yerleştirilmesi durumu için toplam anot yatağı direncini hesaplayalım.



Şekil 3.31 Yatay olarak yerleştirilmiş anotların üniform anot yatağının kesit görünüşü

Şekil 3.31'deki sistem için anot yatağının boyunun hesaplanması gerekmektedir. Bunun için (3.16) eşitliği kullanılabilir.

$$L=2\times L_{BA} + n\times L_A + (n-1)\times L_{AA} \quad (3.16)$$

- L: Dolgu boyu(cm)
- L_{BA} : Dolgu başı ile ilk anot arası mesafe (cm)
- L_{AA} : Uçtan uca anotlar arası mesafe (cm)

$$L=2\times 30 + 5\times 150 + (5-1)\times(450-150) = 2010 \text{ cm}$$

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{30 \times 40}{\pi}} \cong 39 \text{ cm olarak bulunur.}$$

İnterferans faktörünün hesaplanmasında (3.17) eşitliği kullanılır.

$$F_A = 1 + \frac{\rho}{\pi \times L_{AA} \times R_{iç}} \times \ln(0,656 \times n) \quad (3.17)$$

- F_A : İnterferans faktörü
- ρ : Dolgu özgül direnci (Ohm.cm)
- L_{AA} : Anotlar arası uçtan uca mesafe (cm)
- $R_{iç}$: Anodun iç direnci (Ohm)
- n : Paralel bağlı anot sayısı

Yatay olarak yerleştirilmiş demir-silikon anodun iç direncini (3.15) eşitliğini kullanarak bulalım.

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \left[\ln \left(\frac{4 \times 150^2 + 4 \times 150 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 150^2}}{5 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{150} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 150^2}}{150} - 1 \right) \right]$$

$$R_{iç} = 0,21 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

$$F_A = 1 + \frac{50}{\pi \times (450 - 150) \times 0,21} \times \ln(0,656 \times 5) = 1,3 \text{ olarak bulunur.}$$

$$R_{yatay} = \frac{2200}{2 \times \pi \times 2010} \left[\ln \left(\frac{4 \times 2010^2 + 4 \times 2010 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 2010^2}}{39 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{2010} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 2010^2}}{2010} - 1 \right) \right]$$

$$R_{yatay} = 1,05 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

$$R_{eş} = R_{yatay} + \left(\frac{R_{iç}}{n} \right) \times F_A \quad (3.18)$$

$$R_{eş} = 1,05 + \left(\frac{0,21}{5} \right) \times 1,3 = 1,11 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Görüldüğü üzere anotların aynı dolgu içerisine yerleştirilmesi durumunda direnç azalacaktır. Fakat bu durumda anot yatağı dolgu maddesinin miktarı artacaktır. Örnek 3.7 ve Örnek 3.9'daki anot yatağı boyutlarından üniform yatak içerisinde kullanılması gereken fazladan dolgu maddesi miktarını bulabiliriz.

Anotlar üniform anot yatağına yerleştirilince $20,01 \times 0,3 \times 0,4 = 2,4 \text{ m}^3 = 2,4 \text{ Ton}$ kok tozu kullanılır.

Anotlar tek tek anot yatağına yerleştirilince $5 \times 2,1 \times 0,3 \times 0,4 = 1,3 \text{ m}^3 = 1,3 \text{ Ton}$ kok tozu kullanılır.

$2,4 - 1,3 = 0,9 \text{ Ton}$ kok tozu fazla kullanılır.

Fazladan kok tozu kullanılmasına rağmen anot yatağı direnci 1 Ohm değerinin altına düşmemiştir. Bundan sonra anot sayısını arttırarak bu değerin 1 Ohm değerinin altına düşmesi sağlanabilir.

Aynı özelliklerde 7 adet demir-silikon anot kullanılması durumu için toplam anot yatağı direncini yeniden hesaplayalım.

$$L = 2 \times 30 + 7 \times 150 + (7-1) \times (450-150) = 2910 \text{ cm}$$

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{30 \times 40}{\pi}} \cong 39 \text{ cm olarak bulunur.}$$

Yatay olarak yerleştirilmiş demir-silikon anodun iç direncini (3.15) eşitliğini kullanarak bulalım.

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 150} \left[\ln \left(\frac{4 \times 150^2 + 4 \times 150 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 150^2}}{5 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{150} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 150^2}}{150} - 1 \right) \right]$$

$$R_{iç} = 0,21 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

İnterferans faktörünün hesaplanmasında (3.17) eşitliği kullanılır.

$$F_A = 1 + \frac{50}{\pi \times (450 - 150) \times 0,21} \times \ln(0,656 \times 7) = 1,4 \text{ olarak bulunur.}$$

$$R_{yatay} = \frac{2200}{2 \times \pi \times 2910} \left[\ln \left(\frac{4 \times 2910^2 + 4 \times 2910 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 2910^2}}{39 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{2910} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 2910^2}}{2910} - 1 \right) \right]$$

$R_{yatay} = 0,81 \text{ Ohm}$ olarak bulunur.

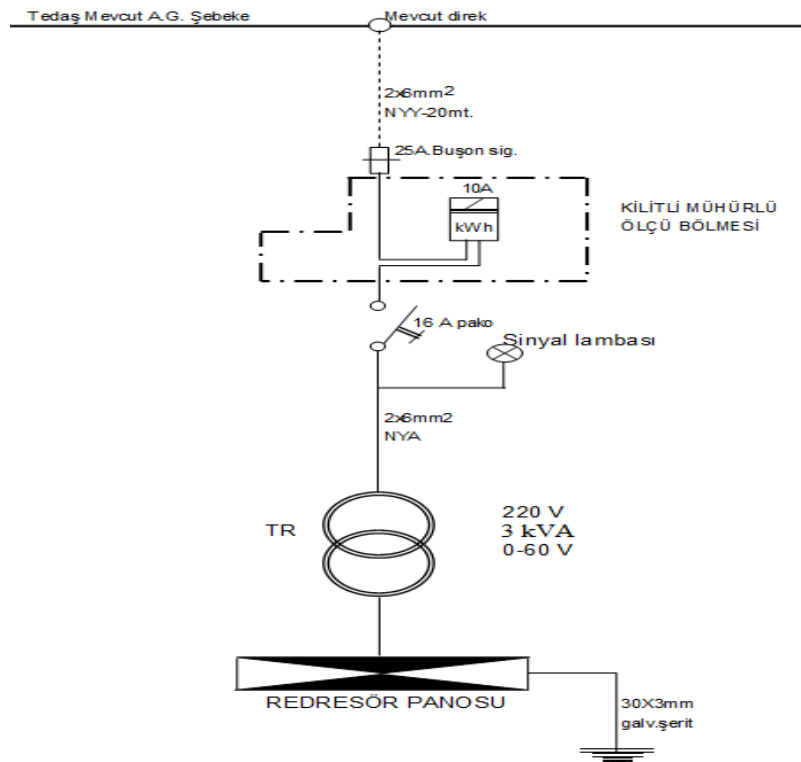
$$R_{eş} = R_{yatay} + \left(\frac{R_{iç}}{n} \right) \times F_A$$

$$R_{eş} = 0,81 + \left(\frac{0,21}{7} \right) \times 1,4 = 0,85 \text{ Ohm} \text{ olarak bulunur.}$$

Görüldüğü üzere paralel anot sayısını arttırmamız halinde anot yatağı direnci ideal 1 Ohm direncinin altına düşmüştür. Direnci düşürmenin bir başka yolu da derin kuyu anot yataklarının açılması ve yardımcı anotların derin kuyulara monte edilmesidir. Fakat bu yöntem pahalı bir yöntem olup; sadece yer sıkıntısının olduğu projelerde zorunluluktan dolayı derin kuyu açılması daha uygun olur.

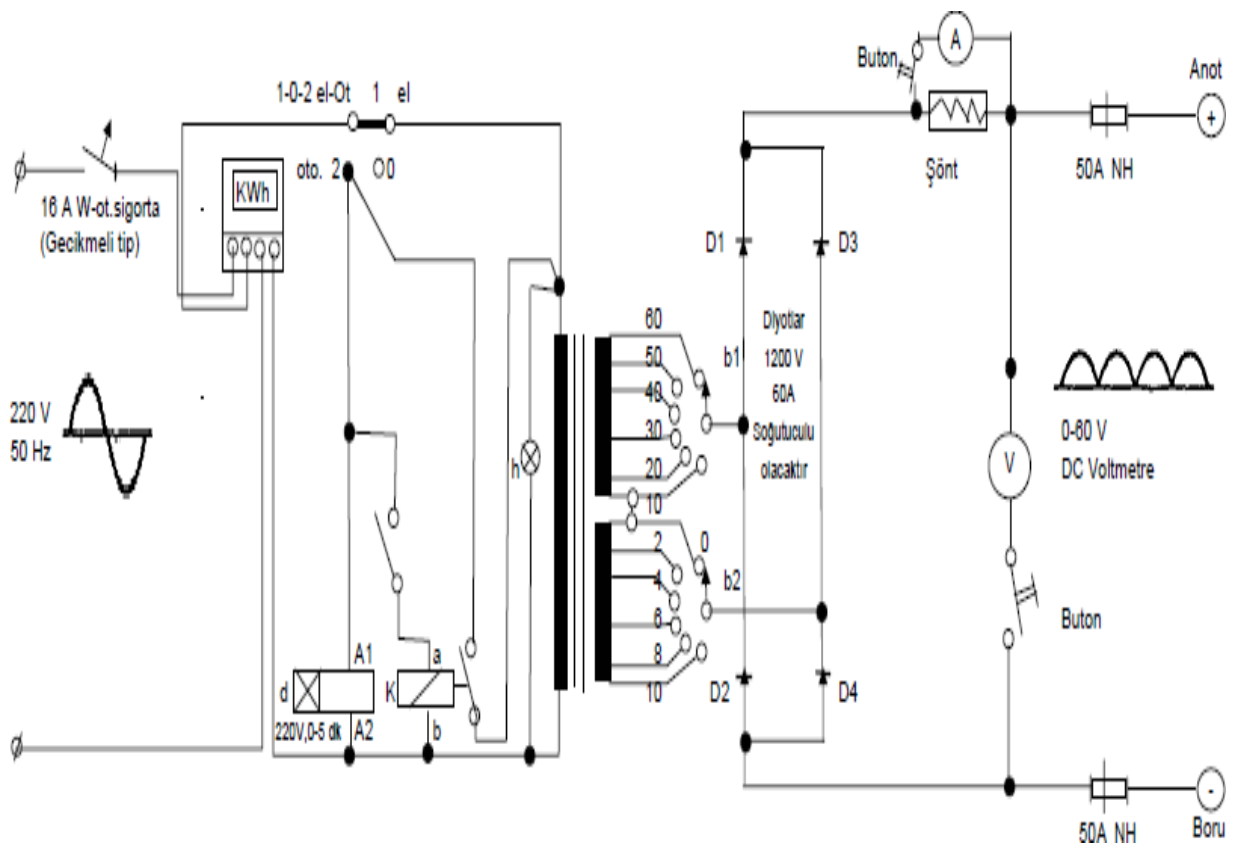
3.2.2.5 Transformatör/Redresör Ünitesi

Katodik koruma sistemlerinde kullanılan transformatör/redresör üniteleri ile şebekeden alınan üç fazlı veya tek fazlı alternatif akım önce bir transformatörden geçirilerek potansiyeli istenilen seviyelere düşürülür. Daha sonra bu düşük potansiyelli alternatif akım bir redresörden (doğrultucudan) geçirilerek doğru akım haline dönüştürülür [16].



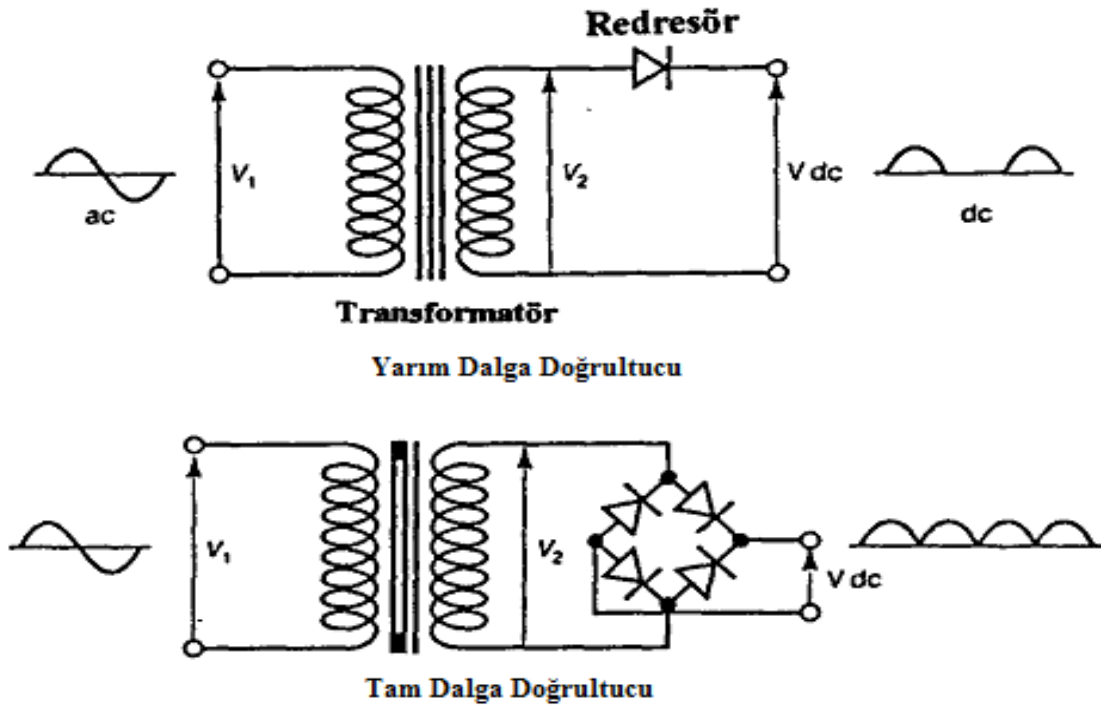
Şekil 3.32 Redresör panosu beslemesi

Enerji girişinde 16 A gecikmeli tip otomatik sigorta, tüketilen enerjinin ölçümünü yapmak için tek fazlı sayaç, sistemin 3 dakika devrede 2 dakika devre dışı bırakmak için kesikli çalışma sistemine ait zaman rölesi ve kontaktörü bulunmaktadır. Doğru akım potansiyelini ve akımını ölçmek amacıyla sekonder tarafta voltmetre ve ampermetre bulunmaktadır. (+) ve (-) uçlarda oluşabilecek ters gerilimlere karşı birer adet 50 A bıçaklı sigorta mevcuttur. Tranformatör/Redresör besleme ünitesinin devre diyagramı Şekil 3.33’de verilmiştir [19].



Şekil 3.33 T/R ünitesi bağlantı şeması

Alternatif akımı doğru akıma çeviren redresörlerde yarı iletken olarak silisyum veya selenyum diyotlar kullanılır. Bu redresörler alternatif akımı yarım dalga veya tam dalga olarak doğru akım haline çevirirler.



Şekil 3.34 Yarım dalga ve tam dalga redresör üniteleri

Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminde korunacak yapının akım ihtiyacına göre T/R ünitelerinin tasarımı yapılır. Bu sistemde dikkat edilmesi gereken hususlardan biri boruya akım uygulandığı noktada boru/toprak potansiyelinin belli bir değeri geçmemesidir. Katodik koruma sisteminde elektrokimyasal tepkime sonucunda katot üzerinde hidrojen toplanması olur. Akım drenaj noktasında katot üzerinde hidrojen çıkışı 1200 mV. civarında başlar. Akım drenaj noktasında boru/toprak potansiyelinin 2000 mV değerini aşması halinde ise hidrojen birikiminden dolayı boru kaplaması zarar görecektir. Bu nedenle uygulama esnasında akım drenaj noktasından sisteme verilen gerilimin maksimum 1200 mV olması gerekir. Sistem tasarımı yapılırken de akım drenaj noktasının gerilimi 1200 mV olarak alınır.

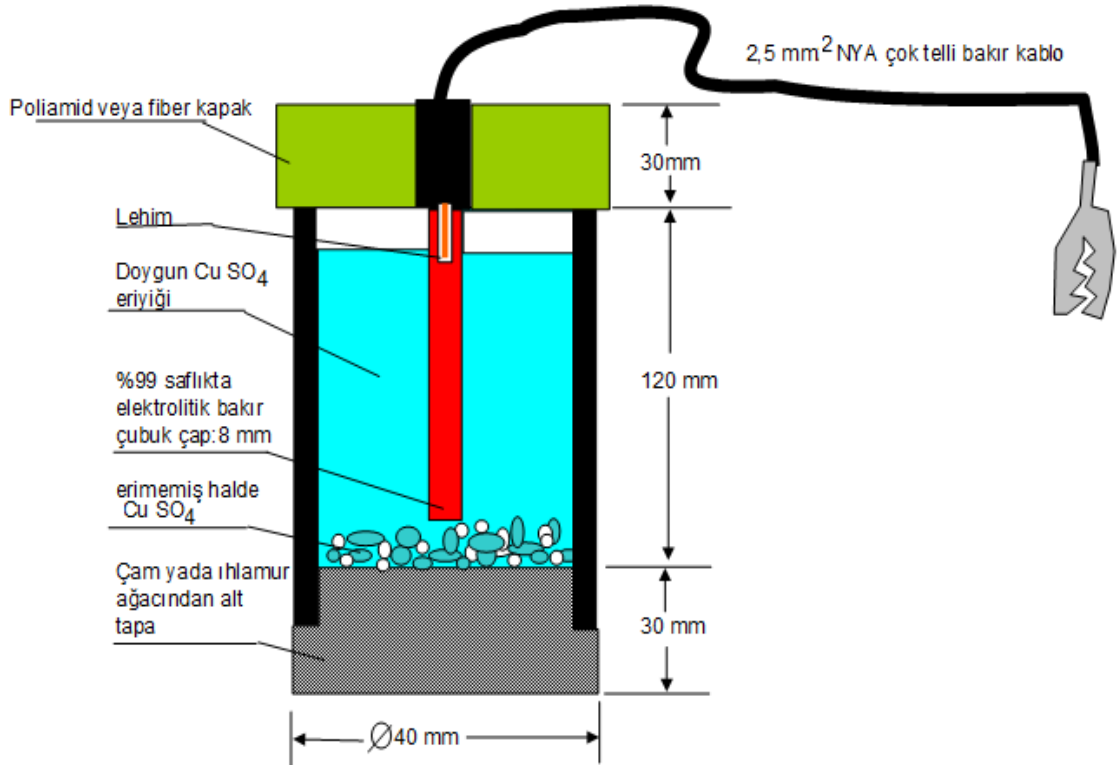
Transformatör-redresör ünitelerinde alternatif akım doğru akıma yaklaşık olarak % 60-70 civarında bir verim ile çevrilebilir. T/R ünitesinin verimi eşitlik (3.18) ile bulunabilir.

$$\text{T/R Verimi (\%)} = \left(\frac{\text{DC Çıkış Gücü}}{\text{AC Çıkış Gücü}} \right) \times 100 \quad (3.18)$$

Doğru akım çıkış gücü, doğru akım çıkış voltajı ile potansiyeli çarpılarak Watt cinsinden bulunur. Alternatif akım giriş gücü ise, girişte alternatif akım için konulan sayaç değerlerine göre hesaplanabilir. Örneğin yarım saat içinde 0,3 kWh elektrik enerjisi harcanmış ise, alternatif akım giriş gücü= 0,3 kWh / 0,5 saat = 0,6 kW= 600 Watt olarak bulunur. Bu süre içinde T/R ünitesinden 20 Volt potansiyelinde 20 Amper doğru akım çekilmiş ise, bu ünitenin doğru akım çıkış gücü= 20 A x 20 V = 400 Watt olacaktır. Bu durumda T/R ünitesinin verimi,

$$\text{T/R Verimi (\%)} = \left(\frac{400}{600} \right) \times 100 = \% 66,7 \text{ olarak bulunur.}$$

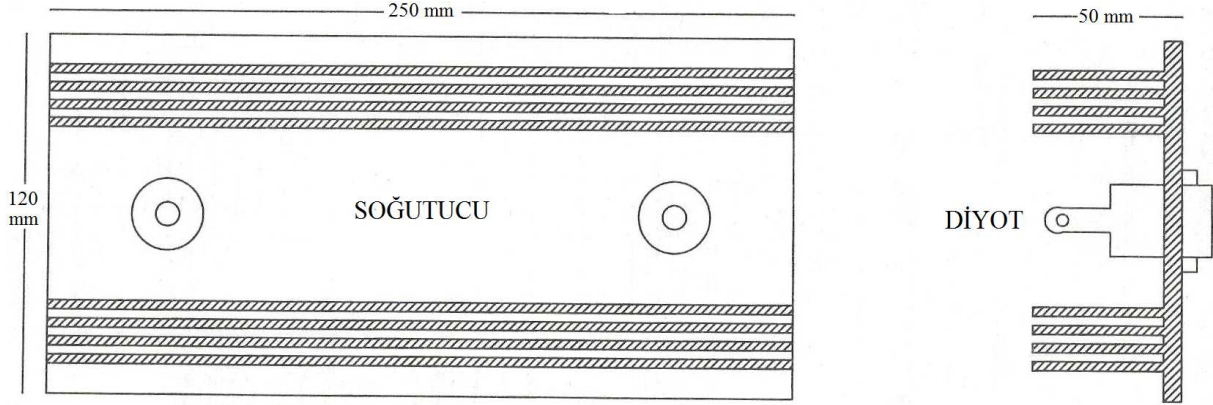
T/R ünitesi korunan metalin bulunduğu ortamdaki değişikliklere göre referans elektrotlar yardımıyla gerekli akım ihtiyacını tespit ederek otomatik olarak verilecek akımı ayarlamakta ve sisteme vermektedir. Referans elektrot olarak da bakır/bakır sülfat elektrodu kullanılır. Normal olarak çelik yapı toprak potansiyelini ölçmek için kullanılır. Bakır sülfat referans elektrodu esas olarak içi boş silindirin içine doldurulmuş bakır sülfat çözeltisi ve bunun içine daldırılmış elektrolitik bakır çubuktan meydana gelir (Şekil 3.34).



Şekil 3.35 Bakır/bakır sülfat referans elektrodu

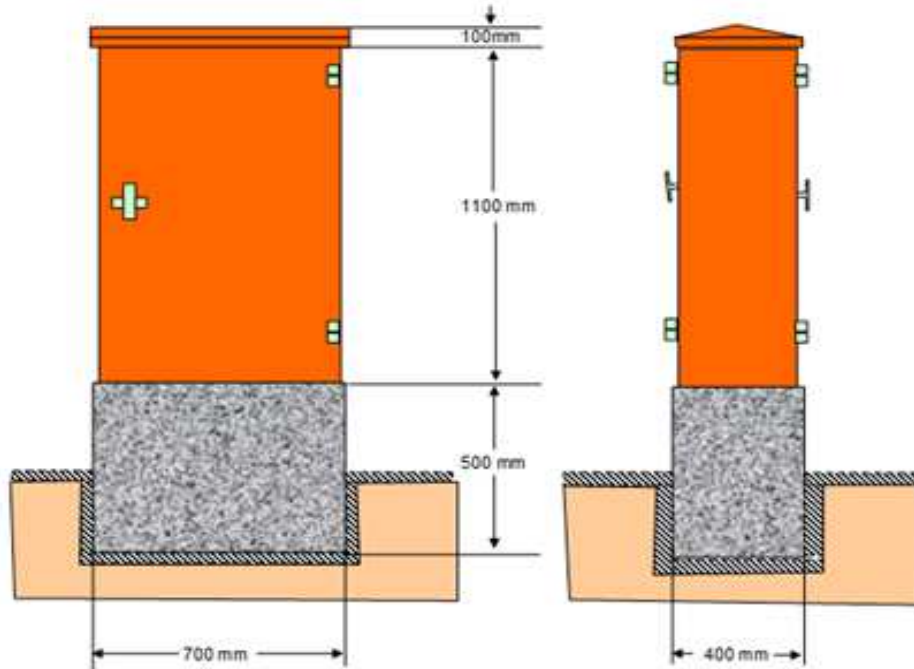
T/R ünitesi kullanıldığı iklim şartlarına veya yerine göre hava ve yağ soğutmalı olarak tasarlanır. T/R tipinin seçiminde en önemli etken trafo ünitesinin en kolay nasıl

soğutulabileceğidir. Yağ soğutmalı tipte, transformatör ve diyotlar transformatör yağı içinde bulunur. Böylece hem elektriki yalıtım hem de soğutma sağlanır. Hava soğutmalı T/R üniteleri ek olarak soğutucu bir üniteye sahip olmalıdır. Diyotların soğutulması alüminyum soğutma gövdeleri ile sağlanır (Şekil 3.35).



Şekil 3.36 Diyot soğutucu boyutları

T/R ünitesi panosu en az 50 cm yükseklikte beton bir kaide üzerine oturmalıdır. Pano kendiliğinden havalanabilir yapıda olmalıdır [12]. Pano malzemesi olarak 2 mm bükme DKP (yassı çelik) sac kullanılacaktır [19].



Şekil 3.37 T/R ünitesi panosu

3.3 Katodik Koruma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Teorik ilkeleri aynı olan katodik koruma sistemleri uygulamada birbirinden oldukça farklıdır. Bu iki sistemden hangisinin uygulanacağını proje aşamasında seçilmesi gerekir. Galvanik anotlu ve dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin seçiminde göz önüne alınması gereken bazı avantaj ve dezavantajları aşağıda özetlenmektedir.

Galvanik anotlu katodik koruma sisteminin avantajları:

- Dış akım kaynağına gerek yoktur. Akım anotlardan sağlanır. Bu sistem elektrik enerjisinin bulunmadığı yerlerde tek seçenektir.
- Yapımı basit ve kolaydır. İşletme sırasında hiç bir ayarı gerektirmez. Çevre yapılar üzerinde kaçak akım etkisi yapmaz.
- Anot-katot arasındaki potansiyel farkı akım ihtiyacını karşılayacak ölçüde otomatik olarak ayarlanır.
- Anoda yakın olan yapının kaplamasında aşırı voltaj nedeniyle soyulma meydana gelmez.
- Ters kutup bağlama tehlikesi yoktur.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin dezavantajları:

- Bu sistemde akım maliyeti yüksektir. Bu nedenle akım ihtiyacı yüksek olan boru hatlarında tercih edilmez. Galvanik anotlu katodik koruma sistemi 0,5 ile 1 mA'den daha az akım ihtiyacı olan boru hatlarında ekonomik olabilir.
- Galvanik anotlu katodik koruma sisteminde devre potansiyeli düşük olduğundan, yüksek elektriksel özgül dirençli zeminler içinde bu sistemin uygulanması güçleşir. Bu yüzden 4000-5000 Ohm.cm'den daha yüksek özgül dirençli zeminlerde uygulanmamalıdır.
- İşletme sırasında herhangi bir nedenle katodik koruma akım ihtiyacında artış olursa, mevcut anotlar ile bunu karşılamak mümkün olmaz. Sisteme yeni anotlar ilave edilmesi gerekir.
- Anotlar boru hattı boyunca dağılmış olduğundan, işletme sırasında kontrolü zordur. Arızanın belirlenmesi için her anodun ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin avantajları:

- Elektrik akımının maliyeti galvanik anotlara göre daha ucuzdur.
- Elektrolit direncinin yüksek olması halinde doğru akım potansiyeli artırılarak rahatlıkla katodik koruma uygulanabilir.
- Proje sırasında göz önüne alınmayan etkenler nedeniyle akım ihtiyacı beklenmedik şekilde değişirse, trafo ünitesinden kolaylıkla ayar yapılabilir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin dezavantajları:

- Bu sistem elektrik akımı bulunmayan yerlerde uygulanamaz. Ancak son yıllarda, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla elde edilebilecek elektrik akımının dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde kullanılması mümkündür.
- Anot yatağı yakınında bulunan yabancı metalik yapılar üzerinde interferans etkisi yaratabilir.
- Yapıya akımın uygulandığı noktada aşırı potansiyel yükselmeleri görülebilir. Bu bölgede hidrojen çıkışı nedeniyle kabuk soyulması ve hidrojen kırılgenliği olayları meydana gelebilir.
- Anoda yakın olan metal yüzeyinde uygun ayar yapılmazsa aşırı voltaj nedeni ile metal kaplamasında soyulma meydana gelebilir.
- Trafo ünitesinin (-) ucu katoda (+) ucu anoda bağlanmalıdır. Yanlışlıkla bunun aksi yapılırsa korunması istenilen yapı kısa süre içerisinde parçalanır.

KATODİK KORUMA SİSTEMLERİNİN TASARIMI

Bu bölümde, arazi etüt çalışmaları, boru hattının karakteristiklerine göre katodik koruma sistemlerinin tasarımı ve ilgili bağıntılara yer verilerek; galvanik ve dış akımlı sistemler için yapılan tasarım çalışmaları incelenmiştir.

4.1 Zemin Etüt Çalışmalar

Katodik korunacak olan metal yapının korozyon hızı öncelikle boru hattının içinde bulunduğu zeminin cinsi ve özelliklerine bağlıdır. Bunun için zemin ile ilgili bazı ölçümler yapılarak zeminin koroziflik derecesi belirlenmelidir.

4.1.1 Zemin Özgül Direncinin Belirlenmesi

Zemin özgül direncinin belirlenmesi için zeminin değişken yapılarda olduğu bölgelerde en az 100 m, en fazla 250 m aralıklarla özgül direnç ölçümleri yapılır. Zeminin tek düze olduğu bölgelerde ise en az 500 m en fazla 1000 m aralıklarla bu ölçümlerin yapılması yeterlidir [12].

Birbirini izleyen iki özgül direnç ölçümü arasında iki kata varan bir değişim görülürse geriye dönülüp ara noktalarda ölçüm yapılması gerekir. Bu ölçümler neticesinde zeminin koroziflik derecesinin tespiti yapılır ve ortalama zemin özgül direncinin değeri katodik koruma sistemlerinin tasarım hesaplarında kullanılır. Zemin özgül direncine göre ortamın koroziflik dereceleri Çizelge 4.1’de verilmiştir [16].

Çizelge 4.1 Zeminin elektriksel özgül direncine göre korozyonluk dereceleri

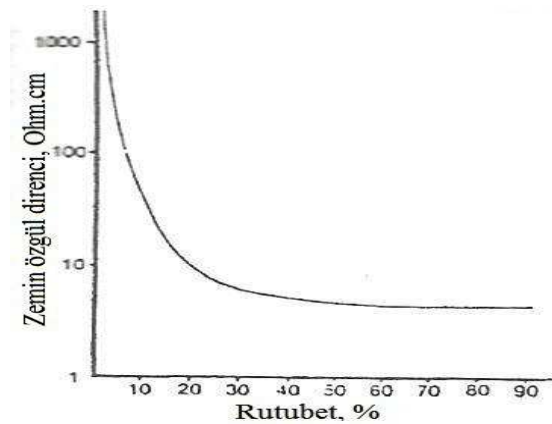
Zemin Elektrik Özgöl Direnci (ρ) (ohm x cm)	Zeminin Korozyon Özelliği	Korozyon Hızı (MPY)
$\rho < 1000$	Çok Korozyon	20-30
$1000 < \rho < 3000$	Korozyon	7-10
$3000 < \rho < 10000$	Orta Korozyon	4-7
$10000 < \rho$	Az Korozyon	1

Ortalama özgül direncin hesaplanmasında eşitlik (4.1) kullanılır [19].

$$\rho_{ort} = \frac{\rho_{top} - \left(\frac{\rho_{maks} + \rho_{min}}{2} \right)}{n - 1} \quad (4.1)$$

- ρ_{top} : Ölçülen özgül direnç değerlerinin toplamı (Ohm.cm)
- ρ_{ort} : Ortalama zemin özgül direnci (Ohm.cm)
- ρ_{maks} : Ölçülen maksimum zemin özgül direnci (Ohm.cm)
- ρ_{min} : Ölçülen minimum zemin özgül direnci (Ohm.cm)

Zemin özgül direnci ile ortamın rutubet oranı ters orantılıdır. Özgül direncin rutubet oranına göre değişimi Şekil 4.1'deki grafikte verilmiştir [11].



Şekil 4.1 Zemin özgül direncinin rutubet oranına göre değişimi

Zemin özgül direnci sıcaklığa da bağlı olup sıcaklık ile ters orantılı şekilde değişim gösterir. Sıcaklığın 0 °C'nin altında olduğu zeminlerde özgül dirençte ani bir artış olur. Bu artışın nedeni zemin içerisindeki serbest suyun donmasıdır. Bu sebepten ötürü zemin özgül direnci ölçümleri yapılırken sıcaklık değerinin de kaydedilmesi gerekir. 15 °C'de ölçülen zemin özgül direnci değeri ile herhangi bir t °C'deki özgül direnç arasında eşitlik (4.2)'deki gibi bir bağıntı vardır [11].

$$\rho_t = \rho_{15} \times \frac{40}{25 + t} \quad (4.2)$$

- ρ_t : t °C'deki zeminin özgül direnci (Ohm.cm)
- ρ_{15} : 15 °C'deki zeminin özgül direnci (Ohm.cm)
- t: Sıcaklık (°C)

Örnek 4.1

Katodik olarak korunacak bir boru hattının geçtiği güzergâh üzerinde zemin özgül direnci ölçümleri yapılmış olup; ölçülen değerler aşağıda verilmiştir. Ölçüm yapıldığı sırada sıcaklığın ortalama 20 °C olduğu tespit edilmiştir. Buna göre 15 °C için zeminin ortalama özgül direnci bulalım.

Sıra	Mesafe (km+m)	Özgül direnç(Ohm/cm)
1-)	0+000	1500
2-)	0+250	2200
3-)	0+500	1400
4-)	0+750	1900
5-)	1+000	3100
6-)	1+250	2000
7-)	1+500	1600
8-)	1+750	1800
9-)	2+000	2200
10-)	2+250	2500

- ρ_{top} : 20200 (Ohm.cm)
- ρ_{maks} : 3100 (Ohm.cm)
- ρ_{min} : 1400 (Ohm.cm)
- n: 10

Eşitlik (4.1) kullanılarak zeminin ortalama özgül direncini hesaplanabilir.

$$\rho_{ort} = \frac{20200 - \left(\frac{3100 + 1400}{2} \right)}{10 - 1} = 1994,4 \text{ Ohm.cm}$$

Zeminin ortalama özgül direncinin belirlenmesinde logaritmik hesaplamalar da yapılabilir. Hattı daha iyi karakterize etmek için öncelikle her noktada ölçülmüş olan değerlerin ortalamasının logaritması alınır. Elde edilen bu logaritmik değerler toplanarak veri sayısına bölünür ve sonuç ters logaritma ile gerçek sayıya dönüştürülür. Elde edilen son sonuç projede kullanmak için daha gerçekçi bir zemin özgül direnci değeridir [20].

Yukarıdaki değerleri kullanarak zemin özgül direnci için logaritmik ortalama değeri bulalım.

<u>Sıra</u>	<u>Özgöl Direnç(Ohm/cm)</u>	<u>Logaritmik Özgöl Direnç.(log ρ_n)</u>
1-)	1500	log(1500)= 3,18
2-)	2200	log(2200)= 3,34
3-)	1400	log(1400)= 3,15
4-)	1900	log(1900)= 3,29
5-)	3100	log(3100)= 3,49
6-)	2000	log(2000)= 3,30
7-)	1600	log(1600)= 3,20
8-)	1800	log(1800)= 3,26
9-)	2200	log(2200)= 3,34
10-)	2500	log(2500)= 3,40
		$\sum \log (\rho_n) = 32,95$

$$\log(\rho_{\text{ort}}) = \frac{\sum \log(\rho_n)}{n} \quad (4.3)$$

$$\log(\rho_{\text{ort}}) = \frac{32,95}{10} = 3,295 \text{ olarak bulunur.}$$

$$\rho_{\text{ort}} = 10^{3,295} = 1972,4 \text{ Ohm.cm olarak bulunur.}$$

15 °C için zeminin ortalama özgül direnci eşitlik (4.2) kullanılarak bulunulabilir.

$$1972,4 = \rho_{15} \times \frac{40}{25 + 20}$$

$\rho_{15} = 2219 \text{ Ohm.cm}$ olarak bulunur. Çizelge 4.1'e göre zeminin korozyon derecesi korozyon olarak belirlenir.

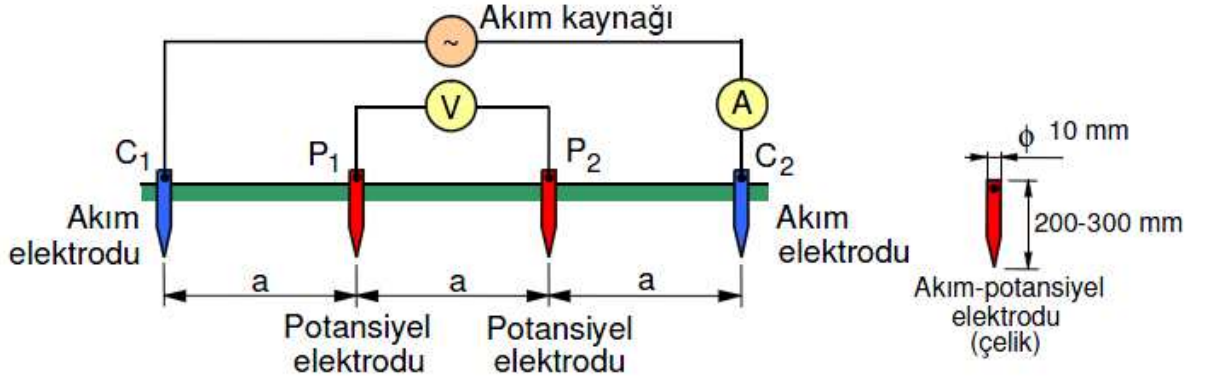
Zemin özgül direncini iki yöntem ile ölçmek mümkündür. Bu yöntemler Wenner dört elektrot yöntemi ve toprak kutusu yöntemidir.

4.1.1.1 Wenner Dört Elektrot Yöntemi

Bu yöntemde zemine sabit aralıklarla (a) elektrot çakılır. Şekil 4.2'de görülen dıştaki elektrotlarla (C_1 ve C_2) zemine akım uygulanır. Bu akımın zemin içinde yaratmış olduğu potansiyel farkı içteki iki elektrot arasından (P_1 ve P_2) ölçülür. Daha sonra toprak özgül direnci, Ohm Kanunu kullanılarak ($R = V / I$) bulunur.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \text{ (Ohm.cm)} \quad (4.4)$$

- ρ : Zeminin elektriksel özgül direnci (Ohm.cm)
- a: Ölçümde kullanılan elektrotlar arası mesafe (cm)
- R: Ölçü cihazı üzerinde okunan direnç değeri (Ohm) (Ω)

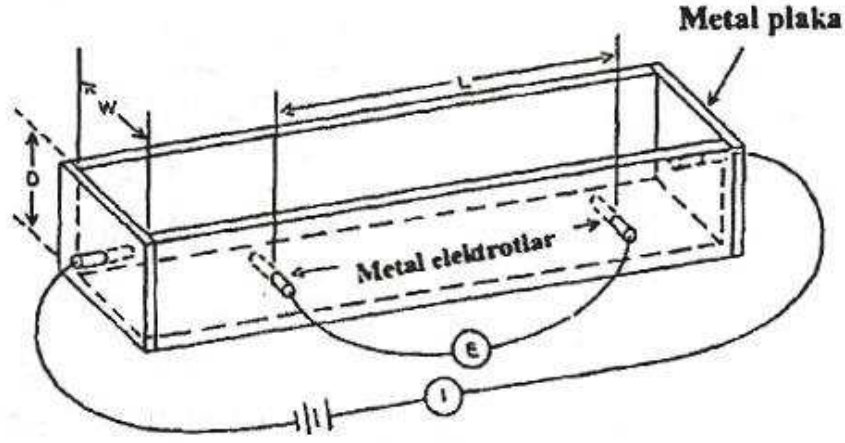


Şekil 4.2 Wenner dört elektrot sistemi

Wenner dört elektrot sisteminde elektrotlar, katodik korunacak olan boru hatlarına dik olarak yerleştirilmelidir. Boru boyunca ya da boruya paralel yerleştirilmeleri, gerçek değerden düşük özgül direnç ölçmemize sebep olur. Ayrıca elektrotların toprağa giren kısmının derinliği olan a mesafesinin $1/20$ 'si olarak alınmalıdır. Kuru havalarda sağlıklı değer alınabilmesi için elektrotlar sulanarak geçiş direncinin azaltılması ve temas yüzeyinin artırılması sağlanabilir. Boru hatları genelde 160 cm derinliğe gömüldüğü için a değeri 160 cm alınır ve buna göre $2 \times \pi \times a = 2 \times \pi \times 160 = 1000$ alınır. Megerden okunan R değeri 1000 ile çarpılarak pratik olarak zeminin özgül direnci bulunabilir [19].

4.1.1.2 Toprak Kutusu Yöntemi

Toprak özgül direncinin korozyona tesir eden en önemli faktör olduğu bilindiğine göre, bu ölçümün çok doğru bir şekilde yapılması gerekir. Genel olarak, toprak özgül direnci düştükçe korozyon artar. Ayrıca, toprak rutubeti arttıkça özgül direnç azalır. Bilinmelidir ki toprak özgül direnci çok kısa mesafelerde ve derinliklerde değişiklik gösterebilir. Bu yüzden numunenin doğru noktadan alınmış olması gerekir. Ana prensip dört elektrotlu Wenner metodu gibidir. Burada da toprakla temas eden 4 adet elektrot bulunur. Bu elektrotların ikisi tabanda iki de kutunun yanlarındadır. Yanlardaki elektrotlardan akım uygulanarak tabandaki iki elektrot arasında oluşan potansiyel değeri okunur. Uygulanan akım ve ölçülen potansiyel değerlerine göre bulunan direnç değeri eşitlik (4.5)'de yerine konularak özgül direnç değeri hesaplanır [11,25].



Şekil 4.3 Toprak kutusu

$$\rho = R \times \frac{W \times D}{L} \quad (4.5)$$

- ρ : Zeminin elektriksel özgül direrci (Ohm.cm)
- R: Ölçülen direnç değeri (Ohm) (Ω)
- L: Ölçü noktaları arasındaki uzaklık (cm)
- W, D: Dikdörtgenin kenar uzaklıkları (cm)

4.1.2 Zemin pH Değerinin Belirlenmesi

Toprağın kimyasal yapısı hakkında bilgi edinebilmek için turnusol kağıdı tabir edilen özel gösterge kağıdı yardımı ile veya doğrudan dijital göstergeli pH metre ile toprağın pH değeri ölçülür. Bu ölçümün yapılabilmesi için, toprağın damıtık su ile doymun hale getirilmiş olması gerekir [25].

Toprak numunelerinin 15–20 cm derinlikten alınmalıdır. Alınan toprak numuneleri pH ölçümü için cam kaplarda saf su ile plastik kıvamında karıştırılır ve elde edilen numune 12 saat beklemeye alınarak numune içerisinde bulunan tuzların çözünmesi sağlanır. Daha sonra pH metre ile bulunan pH değeri ne göre zeminin asidik, bazik veya nötr olup olmadığı belirlenir [19].

Çizelge 4.2 pH değerine göre zeminin değerlendirilmesi

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

pH değerine göre demir-su sistemi için Pourbaix diyagramı Şekil 3.3’de verilmiştir. Bu diyagrama göre pH değerinin 10–12 arasında olması halinde demir yapının korozyona uğramayacağı sonucuna varılabilir.

4.1.3 Zemin Redoks Potansiyelinin Belirlenmesi

Zemin redoks potansiyeli, zemin içindeki platin elektrodunun bakır/bakır sülfat referans elektroda karşı potansiyel değeri ölçülerek eşitlik (4.6) ile hesaplanabilir [12].

$$E_{red} = E_p + E + 60 (pH - 7) \quad (4.6)$$

- E_{red} : Zeminin redoks potansiyel (mV)
- E_p : Platin elektrodunun zemin içerisindeki potansiyeli (mV)
- E : Referans elektrodun hidrojen elektroduna göre potansiyeli (mV) (Doygun bakır/bakır sülfat için 316 mV)

Redoks potansiyeline göre zeminin koroziflik özelliği Çizelge 4.3’de verilmiştir [12].

Çizelge 4.3 Redoks potansiyeline göre zeminin koroziflik özelliği

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

4.2 Katodik Olarak Korunacak Yapının Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi

Katodik koruma sisteminin tasarımını yaparken katodik olarak korunacak yapının bazı karakteristiklerinin bilinmesi gerekir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Korunacak olan yapının yüzey alanı

$$A=\pi \times D \times L \quad (4.7)$$

Burada A silindir şeklindeki korunacak olan yapının m² cinsinden yüzey alanı, D metre cinsinden çapı, L ise yine metre olarak korunacak yapının uzunluğunu ifade eder.

- Korunacak olan yapının uzunluğu (L)
- Korunacak olan yapı boru hattı ise anma çapı (D)
- Korunacak olan yapının et kalınlığı (t)
- Korunacak olan yapının elektriksel direnci
- Kaplama kalınlığı (k)

Çizelge 4.4 Polietilen kaplı çelik boruların minimum kaplama kalınlıkları [26]

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

- Kaplama cinsi (PE, Bitüm, vb.)
- Kaplama direnci (R_k)

Kaplama direncini eşitlik (4.8) ile hesaplamak mümkündür.

R_K kaplama direnci, kaplamanın ρ_K özgül direnci ve s kaplama kalınlığı olmak üzere aşağıda verilen ifade ile belirlenir.

$$R_K = 10^{-5} \times \rho_K \times s \quad (4.8)$$

- R_K : Kaplama direnci (Ohm.m²)
- ρ_K : Kaplama özgül direnci (Ohm.cm)
- s : Kaplama kalınlığı (mm)

Çizelge 4.5 Kaplama çeşidine göre kaplama direnci değerleri

Kaplama Malzemesi	ρ_K (ohm.cm)	s (mm)	R_K (ohm.m²)	R_{K0} (ohm.m²)	s (mm)	R_{KC} (ohm.m²)
Bitum(asfalt)	$>10^{14}$	4	4×10^9	3×10^5	4-10	-10^4
PE	10^{18}	2	2×10^{13}	10^{11}	2-4	-10^5
EP	10^{15}	0,4	4×10^9	10^8	0,4	-10^4
PUR	3×10^{14}	2	6×10^9	10^9	2,5	-

Çizelge 4.5'deki R_K değerleri eşitlik (4.6)'ya göre hesaplanan değerlerdir. R_{K0} değerleri ise laboratuvar ortamlarında veya ortama yerleştirilirken herhangi bir tahribata uğramayan metal yapının (çelik boru, tank, vb.) saha ölçüm değerleridir. Bu değer metal yapı satın alınırken imalatçı firma tarafından verilir. R_{KC} ise genellikle metal yapı toprağa ya da suya yerleştirilirken, kaynaklar yapılırken meydana gelen tahribatlara ve ortamın özgül direncine bağlı olarak boru kaplama direncinin alacağı değerdir. Çok uzun boru hatlarında R_{K0} ile R_{KC} arasındaki fark çok daha artacaktır. Çizelge 4.6'da çelik boru kaplamalarının içerisinde bulunduğu zeminin özgül direncine göre alacağı değerler verilmiştir [27].

Çizelge 4.6 Zemin özgül direncine göre kaplama dirençleri

Ortalama toprak özgül direnci (Ohm.cm)	R _{KC} kaplama direnci (Ohm.m ²)
2500'den az	3000
2500-4000	5000
4000-10000	6000
10000'den fazla	12000

Örnek 4.2

Özgül direnci 3000 Ohm.cm olan bir zemine döşenecek 400 metre uzunluğunda, 40 cm çapında ve 7 mm et kalınlığında olan bir çelik borunun uzunlamasına elektriksel direncini ve kaplama direncini bulalım.

Boru hattının uzunlamasına elektriksel direnci eşitlik (4.9) ile hesaplanır.

$$r = \rho_B \times \frac{L}{A} \quad (4.9)$$

- r: Uzunlamasına elektriksel direnç (Ohm)
- ρ_B : Metal Malzemenin özgül direnci (Ohm.m) (çelik için $1,8 \times 10^{-7}$ Ohm.m)
- A: Kesit Alanı (m²)
- L: Uzunluk

$$r = 1,8 \times 10^{-7} \times \frac{400}{\pi \times (0,207^2 - 0,2^2)} = 8,05 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Boru hattının 1 m²'sinin kaplama direnci 3000 Ohm.cm için Çizelge 4.6'dan 5000 Ohm.m² olarak alınır.

400 metrelik boru hattının kaplama direnci ise;

$$R_K = \frac{5000}{\pi \times 0,4 \times 400} = 9,95 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

4.3 Katodik Koruma Akım İhtiyacının Belirlenmesi

Yeterli katodik koruma sağlamak için gerekli akıma katodik koruma akım ihtiyacı denir. Katodik koruma projesi yapılmadan önce proje hesaplarında kullanılmak üzere akım ihtiyacının belirlenmesi gerekir. Bu yapılmazsa anot miktarı başta olmak üzere proje malzemelerinin cins ve miktarları doğru tayin edilemez [20].

En doğru katodik koruma akım ihtiyacı değerini deneysel yollarla bulmak mümkündür. Fakat proje yapımı sırasında çok defa metal yapılar döşenmemiş olduğundan deneysel tayin yöntemleri tasarım esnasında kullanılamaz. Bunun yerine tahmini değerler, grafiksel kaynaklar ve metal yapının karakteristik özelliklerinin kullanıldığı hesaplamalar kullanılarak bir katodik koruma akımı elde edilir ve buna göre tasarım yapılır.

4.3.1 Akım İhtiyacının Tahmini Olarak Belirlenmesi

Çeliğin kaplamalı ve kaplamasız olarak çeşitli ortamlarda korunması için gerekli olan yaklaşık akım ihtiyacı değerleri literatürde listeler halinde verilmiştir. Zemin içinde bulunan metal yapının akım ihtiyacı büyük ölçüde kaplama kalitesine ve direncine bağlıdır. Metal yapının içinde bulunduğu zeminin direnci boru kaplama direnci yanında çok küçük kaldığından ihmal edilebilir. Bir fikir vermek üzere, Çizelge 4.7’de zemin özgül direncine göre, Çizelge 4.8’de bazı ortamlara göre, Şekil 4.4’de çeşitli ortamlara ve kaplama cinsine göre, Çizelge 4.9’da kaplama cinsine göre ve Çizelge 4.10’de kaplama direncine göre tahmini akım ihtiyacı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 Çıplak çelik yapıların zemin özgül direncine göre ortalama akım ihtiyacı [12]

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

Çizelge 4.8 Bazı ortamlara göre ortalama akım ihtiyacı [1,27]

Ortam Koşulları	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m ²)
Hareketli deniz suyu içinde çıplak çelik	100 – 160
Durgun deniz suyu içinde çıplak çelik	55 – 85
Deniz dibi çamuru içinde çıplak çelik	20 – 30
Rutubetli zemin içinde çıplak çelik	10 – 20
Zemin veya su içinde zayıf kaplamalı çelik	1 – 2
Zemin veya su içinde iyi kaplanmış çelik	0,05
Zemin veya su içinde polietilen kaplanmış çelik	0,005
Anerobik bakterili toprak içinde çıplak çelik	20 – 40
Beton içinde çıplak çelik	15 – 55

ZEMİN

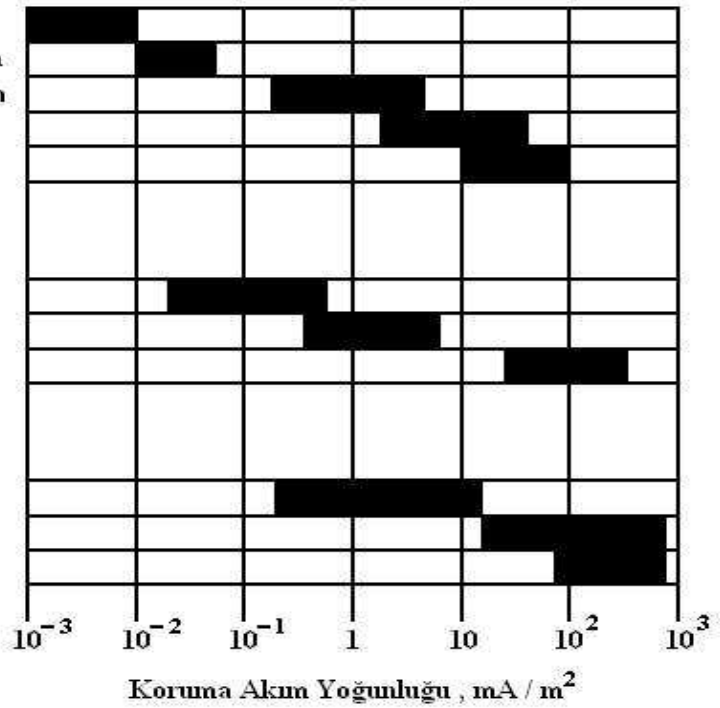
Polietilen kaplama
Çift kat sargılı bitüm
Tek kat sargılı bitüm
Jüt sargılı bitüm
Kaplamasız

TATLI SU

İyi kaplamalar
Eski kaplamalar
Kaplamasız

DENİZ SUYU

İyi kaplamalar
Eski kaplamalar
Kaplamasız



Şekil 4.4 Çeşitli ortamlara ve kaplama cinsine göre yaklaşık akım ihtiyacı değerleri

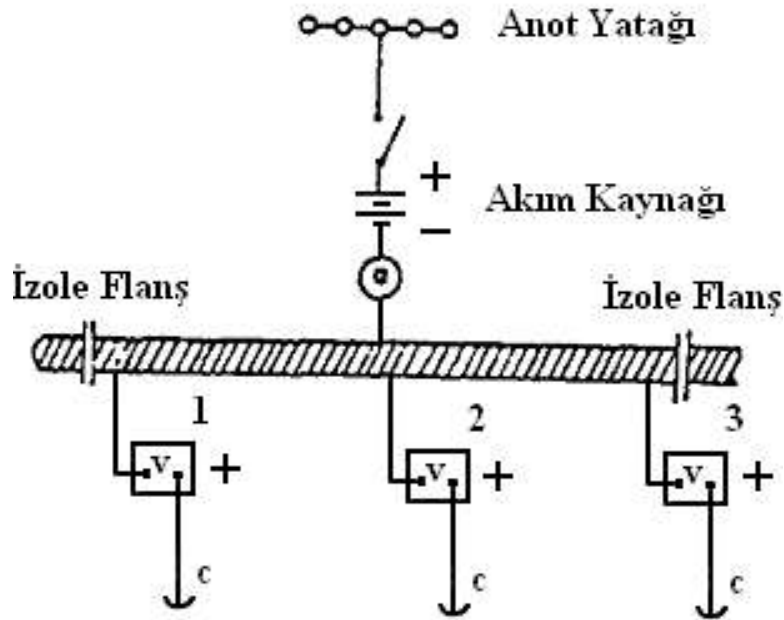
Çizelge 4.9 Kaplama cinsine göre ortalama akım ihtiyacı [12,27]

Kaplama Cinsi	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m²)
Sıcak bitüm kaplama	0,5 – 2,0
Bitüm emdirilmiş tek kat sargılı kaplama	0,2 – 0,5
Bitüm emdirilmiş tek kat cam elyaf sargılı kaplama	0,05 – 0,2
Bitüm emdirilmiş çift kat cam elyaf sargılı kaplama	0,005 – 0,05
Polietilen veya plastik kaplamalar	0,005
Epoksi veya yüksek performanslı kaplama	0,01 – 0,05
Eski boya kaplama	1–3
Eski asfalt veya diğer bozulmuş kaplamalar	0,5 – 3,5
Beton içinde çıplak çelik	15 – 55

Çizelge 4.10 Kaplama direncine göre ortalama akım ihtiyacı [11]

Kaplama Kalitesi	Kaplama Direnci (Ohm.m²)	Ortalama Akım İhtiyacı (i) (mA/m²)
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

Kaplama direncinin belirlenmesinde Çizelge 4.6'daki zemin özgül direncine göre kaplama direnci değerleri kullanılabileceği gibi, deneysel hesaplamalarla da kaplama direnci tespit edilebilir. Bunun için basit bir deney düzeneği kurulur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Kaplama direnci tespiti için deney düzeneği

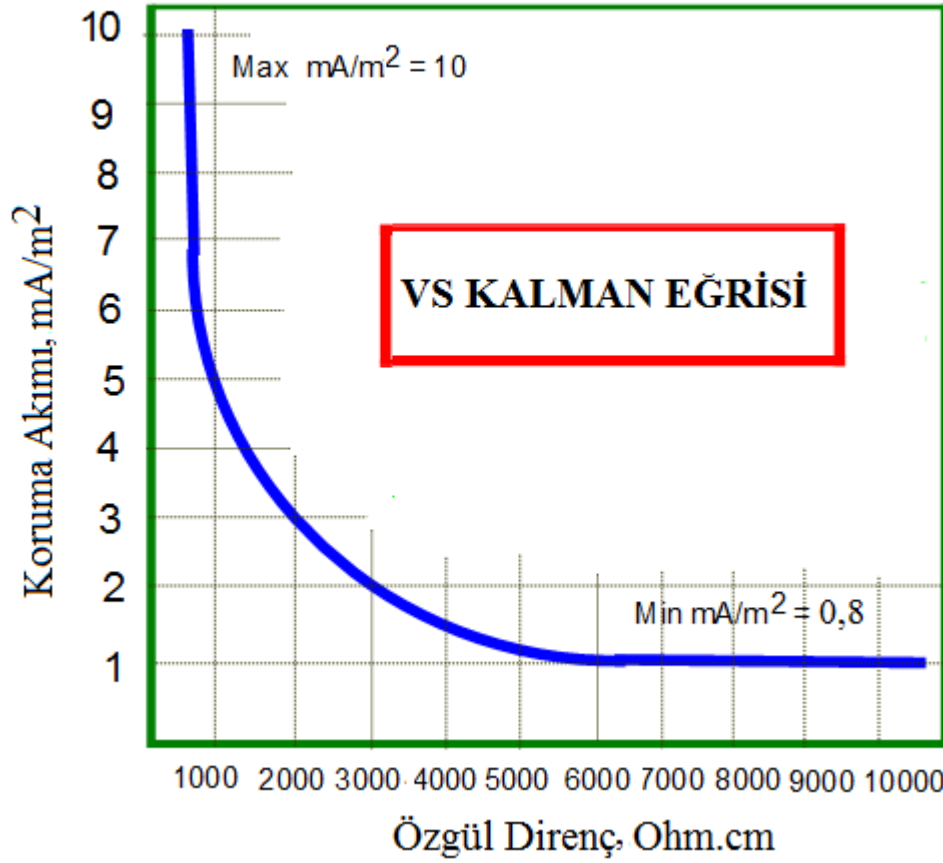
Bu deney sisteminde orta noktadan bir akım uygulanarak boru hattı üzerinde belirlenen en az üç istasyonda boru/zemin potansiyelleri ölçülür. Akım kaynağından boru hattına uygulanan akımın zamanla değişmeyecek şekilde kararlı hale gelmesi beklenir. Uygulanan akım şiddeti boru/zemin potansiyelini en az -0,85 Volt düzeyine çıkarabilmelidir. Akım devresine bir otomatik akım kesici konularak akımın 30 saniye on ve 15 saniye off olması sağlanır. Bütün ölçüm istasyonlarında aynı anda on ve off potansiyel değerleri ölçülür. Ölçülen bu on/off potansiyellerinin farkı alınarak her istasyon için potansiyel değişimi belirlenir. Boru hattının akım altındaki potansiyel değişimini bulmak için elde edilen bütün on/off potansiyel farklarının ortalaması alınır. Böylece elde edilen boru potansiyeli değişiminin, boruya uygulanan sabit akım şiddetine oranı boru kaplama direncini verir [1].

Örneğin üç istasyon için ölçülen on/off potansiyellerinin farkının ortalaması -0,5 V olsun. Boru hattına 0,9 A akım uygulanıyorsa ve hattın uzunluğu 2 km, borunun çapı 60 cm ise kaplama direnci,

$$R_{KC} = (0,5/0,9) \times \pi \times 2000 \times 0,6 \approx 2095 \text{ Ohm.m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

4.3.2 V.S. Kalman Eğrisi İle Akım İhtiyacının Belirlenmesi

V.S. Kalman eğrisi katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesinde pratik bir çözümdür. Ortalama zemin özgül direncine bağlı olarak V.S. Kalman eğrisinden okunan koruma akım miktarları kaplamasız çelik yapılar için olup kaplama cinsine göre tahsis faktörleri kullanılarak 1 m² çelik yapının ihtiyacı olan katodik koruma akımı tespit edilebilir.



Şekil 4.6 V.S. Kalman eğrisi

V.S. Kalman eğrisinden alınan koruma akım değerlerinin çarpılacağı boru kaplamasına göre değişen tahsis faktörleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Kaplama cinsine göre tahsis faktörleri [28]

Kaplama Cinsi	Tahsis Faktörü
Kaplamasız yeni yapı	1
Kaplamasız eski yapı	3
Polietilen kaplamalı yeni yapı	1/8
Polietilen kaplamalı eski yapı	1/2
Bitüm kaplamalı yeni yapı	1/3

V.S. Kalman eğrisi değerleri ile hazırlanmış Çizelge 4.12 koruma akım ihtiyacının belirlenmesinde kolaylık sağlayacaktır.

Çizelge 4.12 V.S. Kalman eğrisine göre özgül direnç ve akım değerleri [28]

Özgül Direnç, ρ (Ohm.cm)	Akım İhtiyacı (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

4.3.3 Akım İhtiyacının Hesaplanması

Katodik koruma sistemlerinin tasarımı yapılırken akım ihtiyacını tahmini ve grafiksel olarak belirlemek mümkündür. Galvanik sistem için tahmini seçim ile veya V.S. Kalman eğrisi ile akım ihtiyacını belirlemek çoğu zaman kullanılan yöntemdir. Fakat dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri için geliştirilmiş bağıntılar vardır. Bu bağıntılar sayesinde dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin maksimum koruyabileceği mesafe, katodik koruma akım ihtiyacı kolayca tespit edilir. Özellikle boru hatlarının akım ihtiyacının tespitinde bu bağıntılar katodik koruma projeleri yapan firmalar tarafından sıkça kullanılır.

Bir boru hattına belli bir noktadan akım uygulandığında, akımın uygulanmış olduğu noktada boru/zemin potansiyeli maksimum bir değer kazanır. Bu noktadan itibaren boru üzerinden akan akımın şiddeti ve boru/zemin potansiyeli mesafe ile gittikçe azalır. Boru üzerinde mesafe ile akımın azalışı, borunun uzunlamasına direncine, kaplamanın iletkenliğine (veya direncine) ve borunun içinde bulunduğu zeminin özgül direncine bağlıdır. [11].

Sönüm sabiti akım ihtiyacının ve koruma akımı ihtiyacının belirlenmesi için kullanılan bağıntıların içerisinde kullanılır. Eşitlik (4.10) ile sönüm sabitini hesaplamak mümkündür.

$$a = \sqrt{\frac{r}{R_{KC1}}} \quad (4.10)$$

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

1 m borunun uzunlamasına direnci doğrudan eşitlik (4.11) ile bulunabilir.

$$r = \frac{\rho_B}{\pi \times (D - t) \times t} \quad (4.11)$$

- ρ_B : Metal Malzemenin özgül direnci (Ohm.m) (çelik için $1,8 \times 10^{-7}$ Ohm.m)
- D: Boru çapı (m)
- t: Boru malzemesinin et kalınlığı (m)

1 m borunun kaplama direnci doğrudan eşitlik (4.12) ile bulunabilir.

$$R_{KC1} = \frac{R_{KC}}{\pi \times D} \quad (4.12)$$

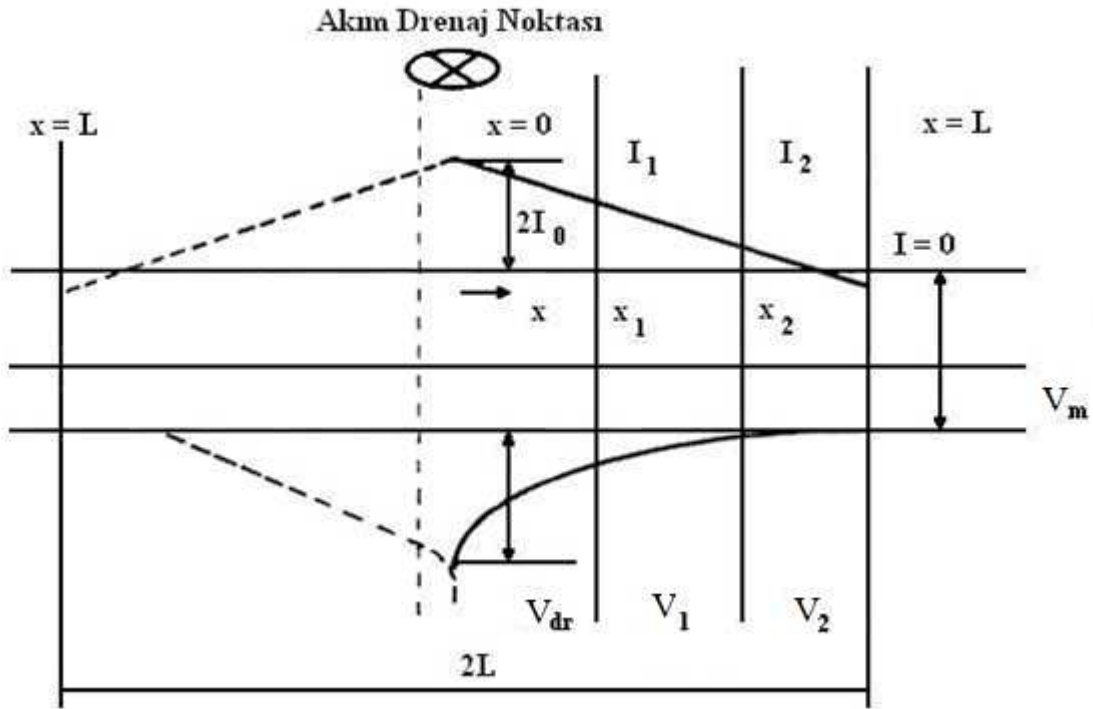
- R_{KC} : Kaplama direnci (Ohm m²)

Bu iki direnç yardımı ile 1 m uzunluğundaki boru hattının karakteristik direnci R_k (Ohm) (4.13) eşitliği ile hesaplanır:

$$R_k = \sqrt{R_{KC1} \times r} \text{ Ohm} \quad (4.13)$$

4.3.3.1 Sonlu Boru Hattının Akım İhtiyacı

Sonlu boru hattından kasıt boru hattının bir izole flanşla sınırlandırılmasıdır. Katodik koruma kriterine göre, boru hattı boyunca tüm noktalarda ölçülen boru/toprak potansiyeli, -850 mV'dan (doymuş bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre) daha negatif olmalıdır. Boru hattına akım akıtma noktasında (akım drenaj noktasında) boru/toprak gerilim değeri en yüksek değerdedir. Bu noktadan itibaren gerilim ve akımdaki değişim iki tarafa doğru hiperbolik fonksiyon olarak azalır [29].



Şekil 4.7 İzole flanşlı boru hattının akım-gerilim grafiği

Hiperbolik değişime göre gerilim ve akım ifadeleri (4.14) ve (4.15) eşitlikleri ile hesaplanabilir.

$$V_1 = V_2 \times \cosh [a \times (x_2 - x_1)] + R_K \times I_2 \times \sinh [a \times (x_2 - x_1)] \quad (4.14)$$

$$I_1 = I_2 \times \cosh [a \times (x_2 - x_1)] + \frac{V_2 \times \sinh [a \times (x_2 - x_1)]}{R_K} \quad (4.15)$$

- V_1, V_2 : 1 ve 2 noktasındaki gerilim değişimi (V)
- I_1, I_2 : 1 ve 2 noktasındaki 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)

(4.14) ve (4.15) eşitliklerinde verilen genel formüllerde, drenaj noktası için $x_1 = 0$ alınır ve x_2 ise korunabilecek maksimum uzaklık (L) olarak alınırsa, $x_2 - x_1 = L$ olur. Korunabilen en uç noktada $V_2 = 0,4$ V alabiliriz. Bunun nedeni 0,45 V olarak kabul edilen boru tabi potansiyelinden 0,4 V'luk sapma yaparak boru sonunda da 0,85 V koruma kriterini sağlamaktır. Ayrıca 0,3 V'luk potansiyel kayması kriteri de sağlanmış olur. Emniyet payı ile birlikte $V_2 = V_m = V_S = 0,45$ V olarak alınabilir. Yine bu uç nokta için I_2 değeri ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece gerilim değişimi ifadesinde ikinci terim ihmal edilebilir. V_1 de V_{DR} ile ifade edilirse; akım drenaj noktasındaki gerilim değişimi eşitlik (4.16)'daki gibi olur.

$$V_{DR} = V_S \times \cosh(a \times L) \quad (4.16)$$

Sınırlı L aralığının korunması durumu için akım ihtiyacı (I_K) ise eşitlik (4.17) ile bulunabilir.

$$I_K = (V_S / R_K) \times \sinh(a \times L) \quad (4.17)$$

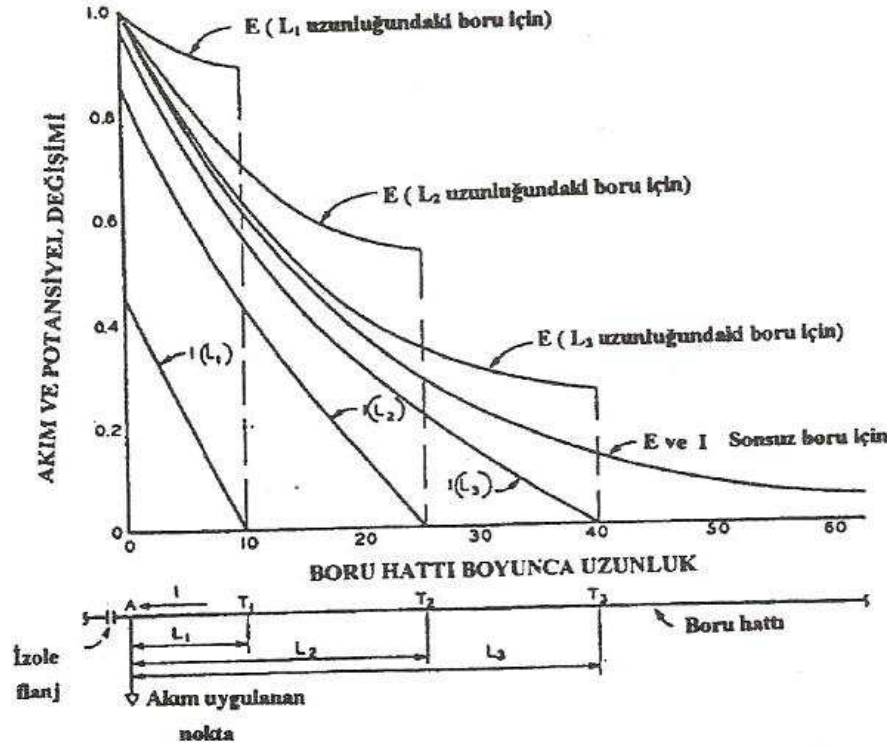
Korunabilecek maksimum boru uzunluğu (L_{maks}) ise $V_{DR} = 1,2$ Volt, $V_S = 0,4$ V alınarak eşitlik (4.18) yardımıyla bulunabilir.

$$L_{maks} = \frac{\cosh^{-1}(V_{DR} / V_S)}{a} \quad (4.18)$$

Akım drenaj noktasından x metre mesafedeki akım ve gerilim ifadeleri (4.19) ve (4.20) eşitlikleri ile hesaplanabilir.

$$I_x = I_D \times \frac{\sinh[a \times (L - x)]}{\sinh(a \times L)} \quad (4.19)$$

$$V_x = V_D \times \frac{\cosh[a \times (L - x)]}{\cosh(a \times L)} \quad (4.20)$$



Şekil 4.8 Sonlu ve sonsuz boru hattının akım-gerilim değişimi grafiği

İzole flanşlı sisteme akım boru hattının ortasından uygulanıyorsa, akım drenaj noktasından çıkan akımlar iki yöne doğru olup toplam korunan alan L değil, 2L olacaktır. Toplam korunan alanı bulmak için akım tek yöne doğru uygulanıyormuş gibi işlem yapıp, maksimum koruma uzunluğu için bulunan L_{maks} değeri 2 ile çarpılıp iki yöne korunabilecek toplam uzunluk bulunur. Bu durumdaki toplam akım ihtiyacı ise tek yönlü için hesaplanan değer iki katı olacaktır.

Örnek 4.3

20 km uzunluğundaki bir boru parçasına bir uçtan akım uygulayarak boru potansiyeli akım drenaj noktasında 1,2 Volt artmıştır. Bu boru hattının sönüm sabiti $0,63.10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ise boru hattının öteki kapalı ucunda meydana gelen gerilim değişimini hesaplayalım.

$$1,2 = V_S \times \cosh(0,63.10^{-4} \times 20000)$$

$V_S = 0,63$ Volt olarak bulunur. Aynı sonucu Şekil 4.8'deki grafik yardımıyla da bulmak mümkündür.

Örnek 4.4

Örnek 4.3'teki boru hattının uzunluğu 25 km olması halinde hat sonundaki gerilim değişimi değerini ve akım drenaj noktasından 20 km mesafede meydana gelecek gerilim değişimini bulalım.

$$1,2 = V_S \times \cosh(0,63.10^{-4} \times 25000)$$

$$V_S = 0,48 \text{ volt}$$

$$V_{20} = 1,2 \times \frac{\cosh[0,63.10^{-4} \times (25000 - 20000)]}{\cosh(0,63.10^{-4} \times 25000)}$$

$$V_{20} = 0,5 \text{ Volt olarak bulunur.}$$

Örnek 4.5

Örnek 4.3'teki 20 km'lik izole flanşlı boru hattının ortasından akım uygulanması halinde maksimum koruma mesafesini, minimum drenaj gerilim değişimini ve minimum şartlar için katodik koruma akım ihtiyacını bulalım. ($V_S = 0,4$ Volt, $V_{DR} = 1,2$ Volt, $R_k = 0,1$ Ohm)

$$L_{\text{maks}} = \frac{\cosh^{-1}(1,2 / 0,4)}{0,63.10^{-4}}$$

$$L_{\text{maks}} = 27980 \text{ olarak bulunur.}$$

İki yöne korunabilecek maksimum uzunluk $= 2 \times L_{\text{maks}} \approx 56$ km olarak bulunur. Boru hattı 20 km olduğu için katodik koruma için tek istasyon yeterli olacaktır.

Boru hattının sonundaki gerilim değişiminin minimum 0,4 Volt olması katodik koruma kriterlerinin yerine getirilebilmesi için yeterlidir. O halde hat sonu gerilim değişimi 0,4 Volt

alınarak akım drenaj noktasındaki minimum gerilim değişimi bulunabilir.

$$V_{DRmin} = 0,4 \times \cosh[0,63.10^{-4} \times (20000/2)]$$

$V_{DRmin} = 0,48$ Volt olarak bulunur. Bu durumda minimum şartlar için sistem korunmuş olur. Ayrıca akım drenaj noktasındaki gerilim kademesi 1,2 V'dan 0,48 V civarına düşürülecektir.

Minimum şartlar için katodik koruma akım ihtiyacı (4.17) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$I_{Kmin} = (0,4/0,1) \times \sinh(0,63.10^{-4} \times 10000) = 2,7 \text{ A tek yöne koruma akımı olarak bulunur.}$$

İki yöne koruma akımı ise $2,7 \times 2 = 5,4$ A olarak bulunur.

4.3.3.2 Sonsuz Boru Hattının Akım İhtiyacı

Sonunda izole flanşla sınırlandırılmamış boru hatlarının akım drenaj noktasından itibaren gerilim ve akımındaki değişimi mesafeye bağlı olarak logaritmik bağıntılar ile ifade edilir. Sınırsız boru hattının logaritmik eğrisi Şekil 4.8'de görülmektedir.

$$V_s = V_{DR} \times e^{(-a \times L)} \quad (4.21)$$

$$I_s = I_{DR} \times e^{(-a \times L)} \quad (4.22)$$

- V_{DR} , I_{DR} : Akım uygulanan noktada boru/zemin gerilimi ve akımının değişimi (Volt, Amper)
- V_s , I_s : Akım uygulanan noktadan L m mesafede boru/zemin gerilimi ve akımının değişimi (Volt, Amper)
- a: Sönüm sabiti (m^{-1})
- L: Akım uygulanan noktaya olan uzaklık (metre)

Bu bağıntılar aşağıdaki kabuller yapılarak elde edilmiştir [11].

- Boru hattı boyunca zemin özgül direnci ve boru kaplaması üniform bir yapı göstermektedir.
- Anot yatağı borudan yeterli uzaklıkta (en az 70 m) bulunmaktadır.
- Boru çapı ve et kalınlığı değişmemekte ve ara yerde boru elektriksel direncine etki yapan bağlantılar bulunmamaktadır.

- Boru hattı sonsuz uzunluktadır. Yani boru hattının öteki ucunda izole flanş bulunmamakta ve uygulanan akım tam olarak kayboluncaya kadar boru hattı boyunca akabilmektedir.

L aralığının korunması durumu için akım ihtiyacı (I_K) ise eşitlik (4.23) ile bulunabilir.

$$I_K = \frac{V_S}{R_k} \times e^{(a \times L)} \quad (4.23)$$

Korunabilecek maksimum boru uzunluğu (L_{maks}) ise $V_{DR} = 1,2$ Volt, $V_S = 0,4$ V alınarak eşitlik (4.24) yardımıyla bulunabilir.

$$L_{maks} = \frac{\ln(V_{DR}) - \ln(V_S)}{a} \quad (4.24)$$

Örnek 4.6

15 km uzunluğundaki izole flanşsız bir boru parçasına bir uçtan akım uygulayarak boru gerilimi akım drenaj noktasında 1,2 Volt artmıştır. Bu boru hattının sönüm sabiti $0,63.10^{-4} m^{-1}$ ve karakteristik direnci 0,1 Ohm ise boru hattının sonunda meydana gelen gerilim değişimini, korunabilecek maksimum boru uzunluğunu ve minimum koruma kriterlerine göre katodik koruma akım ihtiyacını bulalım.

$$V_S = 1,2 \times e^{(-0,63.10^{-4} \times 15000)}$$

$V_S = 0,47$ Volt olarak bulunur. Bu durumda minimum koruma kriterleri sağlanmış olur. ($0,47 > 0,40$ olduğundan)

$$L_{maks} = \frac{\ln(1,2) - \ln(0,4)}{0,63.10^{-4}} \approx 17438 \text{ m olarak bulunur.}$$

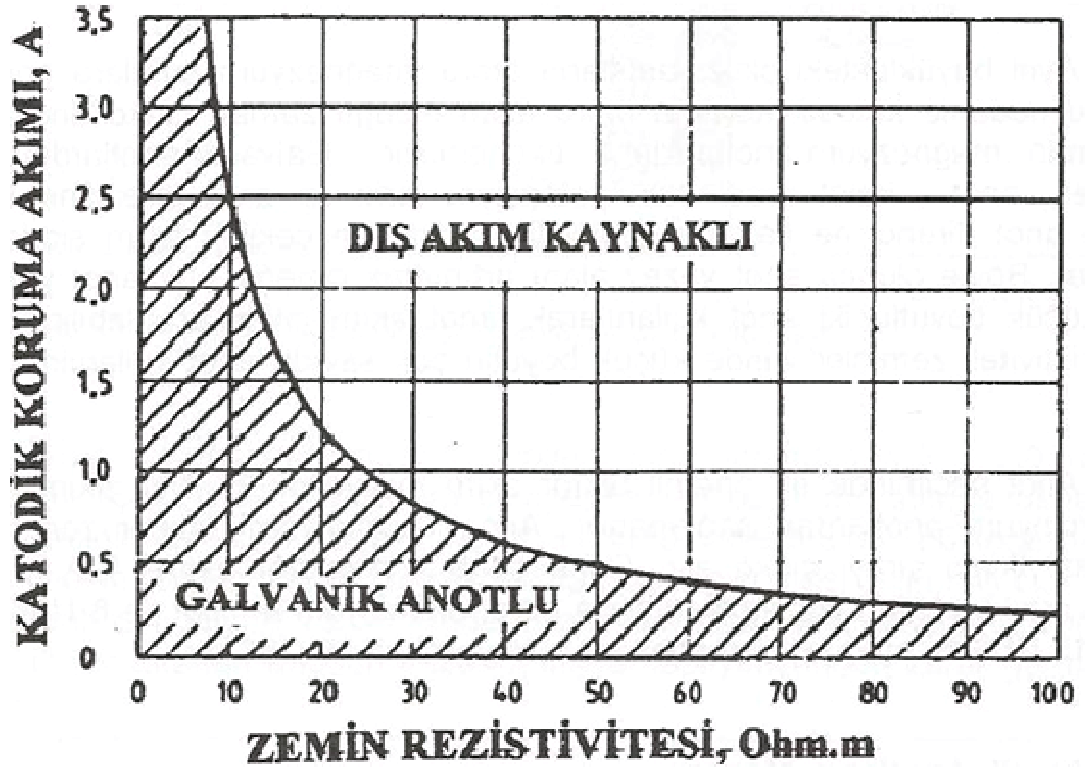
Minimum şartlar için hat sonu gerilim değişiminin 0,4 V olması gerekir. Bu durumda akım drenaj noktasındaki gerilim değişimi bulunmalıdır.

$$0,4 = V_{DRmin} \times e^{(-0,63.10^{-4} \times 15000)} = 1,03 \text{ V olarak bulunur.}$$

$$I_K = \frac{0,4}{0,1} \times e^{(0,63.10^{-4} \times 15000)} = 10,3 \text{ A olarak bulunur.}$$

4.4 Katodik Koruma Yönteminin Seçimi

Katodik koruma sistemlerinde anot yatağı tasarımı yapılmasında öncelikle dış akım kaynaklı ya da galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinden hangisinin seçileceğine karar verilir. Bu seçim yapılırken katodik koruma akım ihtiyacı ve zemin özgül direnci değerleri göz önüne alınır. Katodik koruma seçimine temel oluşturan grafik Şekil 4.9’da verilmiştir [11].



Şekil 4.9 Katodik koruma sisteminin seçim grafiği

4.5 Anot Yatağının Tasarımı

Anot yatağını tasarımı için katodik koruma akım ihtiyacının bilinmesi gerekir. Katodik koruma akım ihtiyacının tahmini, grafiksel ve hesaplamalarla nasıl bulunacağı bir önceki başlık altında incelenmiştir.

Bulunan akım ihtiyacı değerleri, katodik koruma ilk uygulandığında gerekli olan ve metal yüzeyi polarize olmadan önceki akım ihtiyacını ifade eder. Metal polarize olduktan sonra akım ihtiyacında önemli ölçülerde düşüş görülür. Buna karşılık kaplama direnci de zamanla azalır ve akım ihtiyacında artış meydana gelir. Bu çelişik durum göz önüne alınarak katodik koruma süresi içinde geçerli olan ortalama bir akım ihtiyacı değeri belirlenir [11].

Genelde anot yatakları tasarlanırken hesaplanan akım ihtiyacı değerin % 15 fazlası alınır [29]. Belirlenen akım değerine göre anot yatağında kullanılacak anot sayısı belirlenir.

$$I_K = i \times A \text{ (mA)} \quad (4.25)$$

- I_K : Toplam koruma akım ihtiyacı (mA)
- i : Akım yoğunluğu (mA/ m²) (Tahmini seçim veya Kalman eğrisinden)
- A : Korunacak yüzeyin alanı (m²)

$$I = V / R_T \quad (4.26)$$

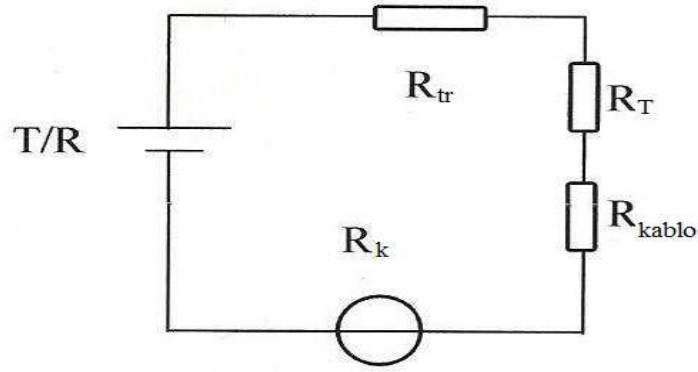
$$N = I_K / I \quad (4.27)$$

- I : Tek anottan çekilen akım (mA)
- V : Anodun çeliğe göre potansiyeli (mV)
- N : Anot sayısı

Anot sayısının belirlenmesinden sonra şartnamede belirtilen katodik koruma ömrüne göre anot yatağı tasarımı yapılabilmek için anot yatağı toplam direncinin belirlenmesi gerekir. Anot yatağı toplam direncini belirlenmesi galvanik koruma ve dış akım kaynaklı koruma için benzer bağıntılarla yapılır. Bölüm 3’de “Galvanik Anotlu Katodik Koruma” ve “Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma” başlıkları altında anot yataklarının toplam dirençlerinin hesaplanması, ömür hesaplarının yapılması ve anotların montajı incelenmiştir.

4.6 Transformator/Redresör Ünitesinin Akım ve Gerilim Değerlerinin Tespiti

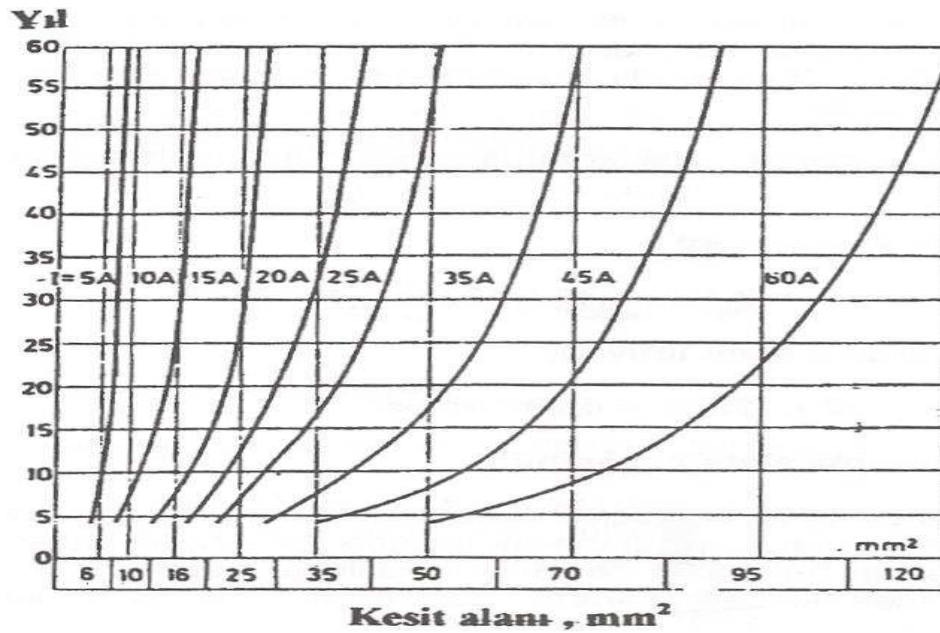
Transformator/Redresör ünitesinin akım ve gerilim değerlerinin belirlenmesi sadece dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri için yapılır. Anot yatağı tasarımı için bulunan akım ihtiyacının yaklaşık % 25 fazlası alınarak T/R ünitesinin akım değeri hesaplanabilir. Gerilim değeri için ise sistemdeki toplam dirençler bulunur ve akım değeri ile toplam direnç değeri çarpılır. Bir dış akım kaynaklı katodik koruma devresine ait dirençler Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Dış akım kaynaklı katodik koruma devresi

- R_{tr} : T/R ünitesinin iç direnci (Ohm)
- R_T : Anot yatağı toplam direnci (Ohm)
- R_{kablo} : sistemdeki kabloların toplam direnci (Ohm)
- R_k : Katodun karakteristik direnci (Ohm)

T/R ünitesinin iç direnci ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Kablo dirençlerinin belirlenmesi için ise kablo kesitlerinin ve toplam kablo uzunluğunun belirlenmesi gerekir. Ekonomik kablo kesiti için, Şekil 4.11'deki grafik kullanılabilir [11].



Şekil 4.11 Ekonomik kablo seçim grafiği

4.7 Tasarım Çalışmaları

Bu başlık altında incelenecek olan tasarım çalışmaları İller Bankası A.Ş. İstanbul Bölge Müdürlüğü'nün denetiminde yapımı devam etmekte olan Sakarya Siemens İçme Suyu Paket Arıtma Tesisi ve Kocaeli Kandıra Namazgâh Barajı Terfi Hattı kapsamında kullanılan çelik yer altı borularının katodik korunması için yapılmıştır.

4.7.1 Siemens İçme Suyu Paket Arıtma Tesisi Çelik Borularının Korunması

Bu tasarım Sakarya Siemens İçme Suyu Paket Arıtma Tesisi merkez şantiyesinde bulunan değişik çaplardaki polietilen kaplı çelik boru hatlarını korozyona karşı korumak için yapılmıştır.

4.7.1.1 Boru Hattı Karakteristikleri

Boru hatlarına ait karakteristik değerler Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13 Boru hattının karakteristikleri

Boru No	Çapı (D) (m)	Boy (L) (m)	Yüzey Alanı (m ²) ($\pi \times D \times L$)
1	0,4	50	62,8
2	0,6	50	94,2
3	0,8	50	125,6
4	1	105	329,7
5	0,7	80	175,8
TOPLAM		335	788

4.7.1.2 Zemin Etüt Çalışmaları

Boru hattı güzergâhı boyunca zeminin korozyon özelliklerini belirlemek, tasarım kriterlerini tespit etmek amacıyla bir dizi ölçümler yapılmış olup bu ölçümler sonucu zeminin korozyon derecesi tespit edilmiştir.

İlk olarak ortalama zemin özgül direnci belirlenmiştir. Wenner dört elektrot sistemi ile yapılan ölçümlerde elektrotlar arası mesafe 150 cm olarak alınmıştır. Ölçüm sonucunda elde edilen özgül direnç değerleri Çizelge 4.14'de verilmiştir.

Çizelge 4.14 Zeminin özgül direnç değerleri

Ölçüm No	Mesafe (km+m)	Elektrot Açıklığı (a) (cm)	Okunan Direnç (R) (Ohm)	Özgül Direnç (ρ) (Ohm.cm) (2×π×a×R)
1	0+000	150	2,2	2072
2	0+150	150	2,7	2543
3	0+335	150	3,1	2920
TOPLAM				7536

$$\rho_{\text{ort}} = \frac{7536 - \left(\frac{2920 + 2072}{2} \right)}{3 - 1} = 2520 \text{ Ohm.cm}$$

Zemin pH değeri ölçümleri ve redoks potansiyeli Çizelge 4.15'deki gibi bulunmuştur.

Çizelge 4.15 pH ve redoks potansiyeli değerleri

Ölçüm No	Mesafe (km+m)	pH Değeri	Hesaplanan Redoks Potansiyeli* (mV)
1	0+000	8,0	382,0
2	0+335	8,1	387,0
ORTALAMA		8,05	384,5
* Eşitlik 4.6 ile bulunmuş olup platin elektrodun zemin içerisindeki potansiyeli yaklaşık 5-6 mV olarak ölçülmüştür.			

- Zemin etüt çalışmaları neticesinde zeminin koroziflik derecesi; Çizelge 4.1'deki zemin özgül direnci değerlerine göre koroziftir.
- Zeminin Çizelge 4.2'ye göre bazik karakterli bir toprağa sahip olduğu görülür.
- Redoks potansiyeline göre ise Çizelge 4.3'den zeminin koroziflik derecesi orta korozif olarak bulunur.
- Bu değerlendirmelere göre boru hattının korozyona karşı korunması gerekir.

4.7.1.3 Akım İhtiyacının Belirlenmesi

V.S. kalman eğrisinden 2520 Ohm.cm zemin özgül direnci için akım ihtiyacının 2,3 mA/m² olacağını görürüz. PE kaplamalar için tahsis faktörünün 1/8 olması nedeniyle katodik koruma akım ihtiyacı V.S. Kalman eğrisine göre $2,3 \times (1/8) \approx 0,3 \text{ mA/m}^2$ olarak bulunur.

İleride kaplamanın eskimesinden ötürü akım ihtiyacının artacağı da göz önüne alınarak akım değeri 0,5 mA/m² olarak alınabilir.

Toplam katodik koruma akım ihtiyacı ise;

$$I_K = 0,5 \times 788 = 394 \text{ mA olarak bulunur.}$$

Şekil 4.9'daki seçim grafiğine göre 2520 Ohm.cm zemin özgül direnci ve 0,394 A değerine göre katodik koruma sisteminin galvanik anotlu olarak seçilmesi gerekir.

4.7.1.4 Anot Yatağı Tasarımı

Çizelge 3.1'de verilmiş olan galvanik anot türlerinin özgül dirence göre kullanım sınırları dikkate alınırsa 2520 Ohm.cm zemin özgül direnci için magnezyum anotların kullanılması gerekir.

Çizelge 3.12'den 2520 özgül direncine göre kullanılabilecek galvanik anot ağırlığı olarak 5-10 kg değeri alınabilir. Bu ağırlıktaki magnezyum anot türü Çizelge 3.4'ten Türk Standardı M-4 tipi magnezyum anot, Çizelge 3.5'den NACE Standardı 17 lb AZ-63 magnezyum anot veya Çizelge 3.6'dan NACE Standardı yüksek potansiyelli 17 lb magnezyum anot seçilebilir.

AZ-63 tipi magnezyum anotların çeliğe göre devre potansiyelleri 650 mV ve yüksek potansiyelli magnezyum anotların çeliğe göre devre potansiyelleri 750 mV alınabilir.

- 17 lb Yüksek potansiyelli magnezyum anot seçilmesi durumu:

Çizelge 3.6'dan 17 lb'lik yüksek potansiyelli magnezyum anodun;

Çıplak boyutları: 9,4 x 9,4 x 65 cm

Paket halindeki boyutları: Çap = 16 cm, Boy = 72,5 cm

İlk olarak kare prizma biçiminde olan magnezyum anodun efektif çapını bulalım.

$$\text{Efektif çap} = 2 \times \sqrt{\frac{9,4 \times 9,4}{\pi}} = 10,62 \text{ cm}$$

Çapı ve boyu belli olan ve zemin içine dik olarak konulmuş olan anodun dolgu yatağına geçiş direncini (iç direnci) hesaplayabilmek için anot yatağı dolgu maddesinin de bilinmesi gerekir. Magnezyum anotlar için Çizelge 3.13’de verilen dolgu tiplerinden Tip A kullanılır. Aynı çizelgeden anot yatağı dolgusunun özgül direncini $\frac{100 + 50}{2} = 75$ Ohm.cm olarak alabiliriz.

$$R_{iç} = \frac{75}{2 \times \pi \times 65} \times \left(\ln \frac{8 \times 65}{10,62} - 1 \right) = 0,53 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey gömülen galvanik anodun anot yatağı direnci,

$$R_{dikey} = \frac{2520}{2 \times \pi \times 72,5} \times \left(\ln \frac{8 \times 72,5}{16} - 1 \right) = 14,34 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey yerleştirilmiş anodun toplam anot yatağı direnci,

$$R_T = R_{dikey} + R_{iç} = 14,34 + 0,53 = 14,87 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Tek anottan çekilen akım $I = 750 / 14,87 = 50,45$ mA

$$\text{Anot Ömrü}_{yp} = \frac{17 \cdot (0,455) \times 0,50 \times 0,85}{0,05045 \times 4} = 16,3 \text{ yıl}$$

Toplam anot sayısı $N = 394 \times 1,15 / 50,45 \approx 9$ adet (Akım ihtiyacının % 15 fazlası alınmıştır.)

- 17 lb AZ-63 tip magnezyum anot seçilmesi durumu:

Çizelge 3.6’dan 17 lb’lik AZ-63 tip magnezyum anodun;

Çıplak boyutları: 10 x 10 x 42,5 cm

Paket halindeki boyutları: Çap = 19 cm, Boy = 60 cm

İlk olarak kare prizma biçiminde olan magnezyum anodun efektif çapını bulalım.

$$\text{Efektif çap} = 2 \times \sqrt{\frac{10 \times 10}{\pi}} = 11,27 \text{ cm}$$

$$R_{iç} = \frac{75}{2 \times \pi \times 42,5} \times \left(\ln \frac{8 \times 42,5}{11,27} - 1 \right) = 0,68 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey gömülen galvanik anodun anot yatağı direnci,

$$R_{\text{dikey}} = \frac{2520}{2 \times \pi \times 60} \times \left(\ln \frac{8 \times 60}{19} - 1 \right) = 14,91 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Dikey yerleştirilmiş anodun toplam anot yatağı direnci,

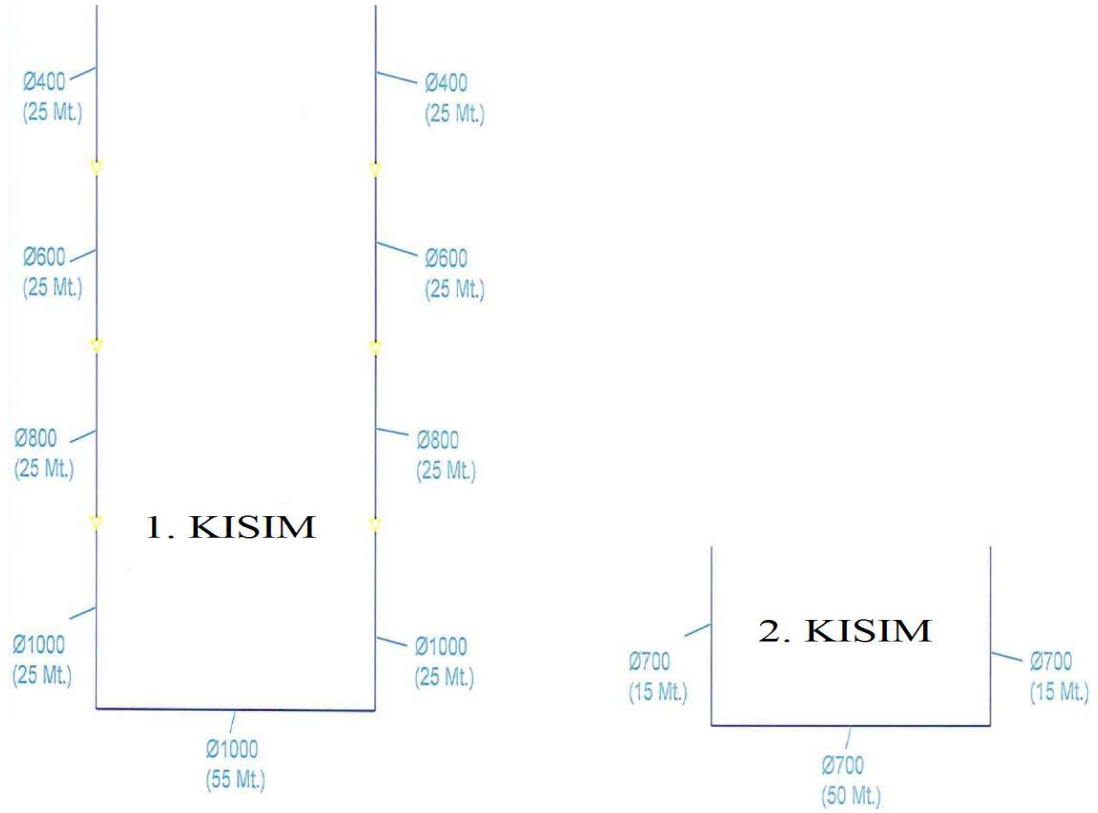
$$R_T = R_{\text{dikeyt}} + R_{\text{iç}} = 14,91 + 0,68 = 15,59 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Tek anottan çekilen akım $I = 650 / 15,59 = 41,69 \text{ mA}$

$$\text{Anot Ömrü}_{\text{yp}} = \frac{17 \cdot (0,455) \times 0,50 \times 0,85}{0,04159 \times 4} = 19,8 \text{ yıl}$$

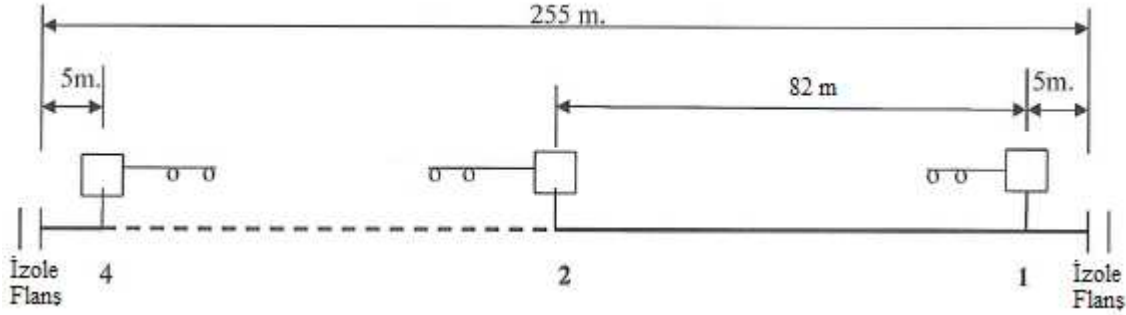
Toplam anot sayısı $N = 394 \times 1,15 / 41,69 \approx 10$ adet

İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde katodik koruma ömrünün en az 15 yıl olması istenir [23]. Bunun için AZ-63 tip veya yüksek potansiyelli magnezyum anotlar istenen ömrü sağladığı için iki anot tipinden biri seçilebilir. Fakat İller Bankası projelerinde genelde yüksek potansiyelli magnezyum anotlar kullanılır.

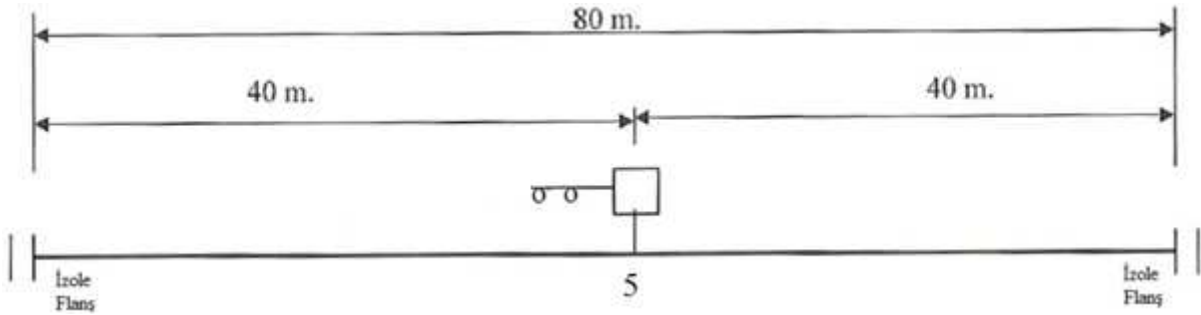


Şekil 4.12 Boru hatlarının görünümü

Görünümü Şekil 12'deki gibi olan boru hatlarına, anotların yerleşimi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki gibi olacaktır.



Şekil 4.13 1. Kısım anot yerleşimi



Şekil 4.14 2. Kısım anot yerleşimi

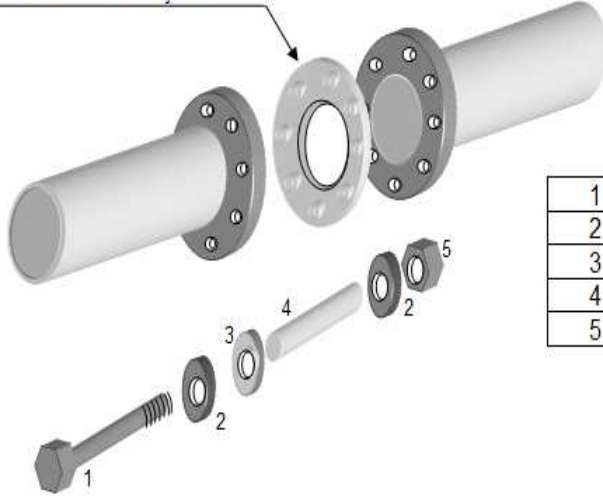
4.7.1.5 Diğer Malzemelerin Seçimi

Katodik koruma akımının toprağa deşarjını ve anotların öngörülen ömürden daha kısa sürede tükenmesini önlemek amacıyla boru hattının başlangıç ve bitiş noktaları izole flanş ile yalıtılmalıdır. İzole flanş İller Bankası Teknik Şartnamesi'ne uygun olmalıdır (Şekil 4.15).

Anotlar 2'li gruplar halinde 5 çeşit borunun her birine monte edilecektir. Ayrıca her anot grubu için TS 5141 Standardı'na uygun 1 adet ölçü kutusu monte edilecektir (Şekil 4.16). Yani toplamda 5 adet ölçü kutusu kullanılacaktır.

Anotlarda ve ölçü kutularının boruya olan bağlantılarında $1 \times 10 \text{ mm}^2$ NYY tipi kablo kullanılacak olup kabloları boruya irtibatında termo kaynak kullanılacaktır.

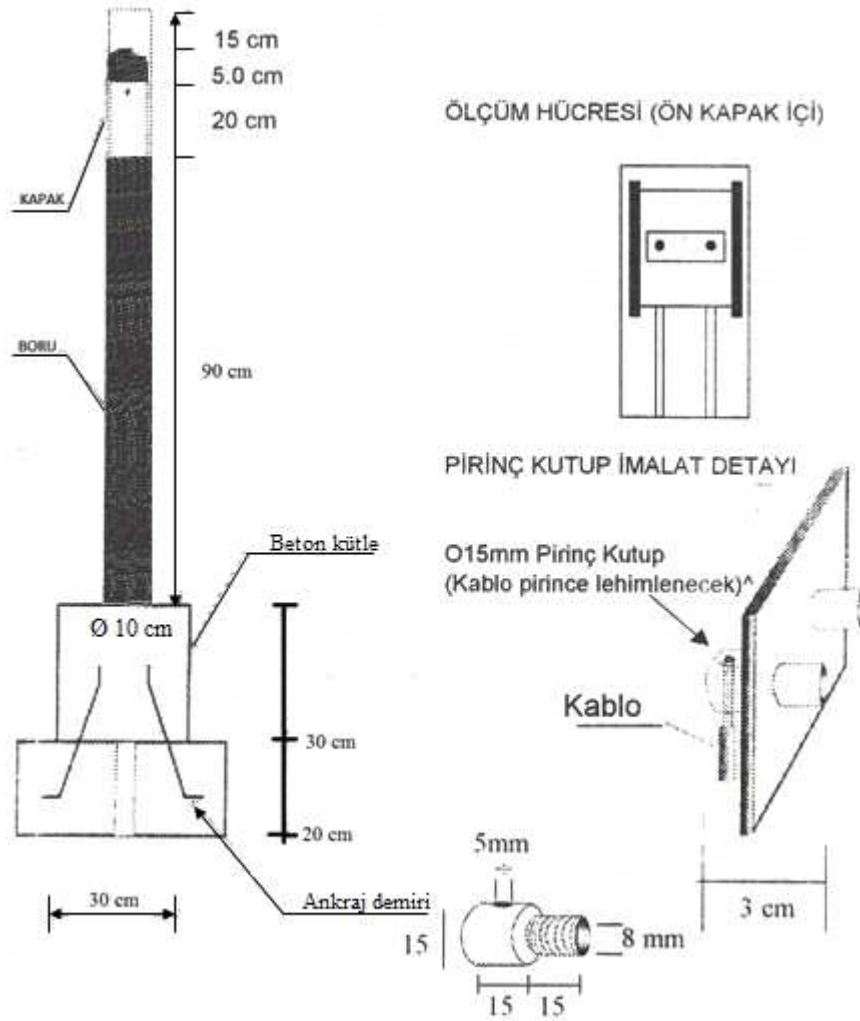
Yüksek elektrik dirençli conta



Malzeme dökümü :

1	ÇELİK SAPLAMA (YETERLİ UZUNLUKTA)
2	ÇELİK PUL VEYA RONDELA
3	FİBER PUL
4	MAKARON VEYA ISI İLE DARALAN BORU
5	ÇELİK SOMUN

Şekil 4.15 İzole flanş [23]



Şekil 4.16 Ölçü kutusu [23]

4.7.1.6 Metraj Listesi

Metraj listesi Çizelge 4.16’ da verilmiştir.

Çizelge 4.16 Metraj listesi

Sıra No	Malzeme Cinsi	Miktarı
1	17 lb YP magnezyum anot	10 adet
2	Ölçü kutusu	5 adet
3	Termo kaynak	10 adet
4	1×10 mm ² NYY	50 metre
5	Ø 500’e kadar izole flanş	2 adet
6	Ø 500’den yukarı izole flanş	2 adet

Siemens İçme Suyu Paket Arıtma Tesisi çelik boruları katodik olarak korunmaz ise ortalama özgül direnci 2520 Ohm.cm olan bir zemin içerisinde çelik borular Çizelge 4.1’e göre 7-10 mm/yıl korozyon hızı ile korozyona uğrayacaktır. Ø 400 çelik boru için yaklaşık et kalınlığı 7 mm ise katodik koruma yapılmaması durumunda boru hattında 0,7–1 yıl içerisinde korozyonun sebep olduğu delinmeler başlayacaktır.

4.7.2 Kandıra Namazgâh Barajı Terfi Hattı Çelik Borularının Korunması

Sözü edilen boru hattı Kocaeli Namazgâh Barajı kanal çıkışından, Kandıra İçme suyu Arıtma Tesisi girişine kadar olan 12140,33 metre uzunluğunda ve 600 mm çapında çelik içme suyu borusu hattıdır.

4.7.2.1 Zemin Etüdünün Yapılması

Boru hattı güzergahında Wenner dört elektrot sistemine göre yapılan ölçümler sonucunda ortalama zemin özgül direncinin 1882 Ohm.cm, ortalama pH değerinin 7,3 ve ortalama redoks potansiyelinin 367,94 mV olduğu saptanmıştır. Anot yatağının yapılacağı zeminin ortalama özgül direnci ise 1041 Ohm.cm olarak saptanmıştır.

- Zemin etüt çalışmaları sonucunda zeminin koroziflik derecesi; Çizelge 4.1’deki zemin özgül direnci değerlerine göre koroziftir.

- Zeminin Çizelge 4.2'ye göre bazik karakterli bir toprağa sahip olduğu görülür.
- Redoks potansiyeline göre ise Çizelge 4.3'den zeminin korozyonluk derecesi orta korozyonluk olarak bulunur.
- Bu değerlendirmelere göre boru hattının korozyona karşı korunması gerekir.

4.7.2.2 Boru Hattı Karakteristikleri

Boru hattına ait uzunluk ve alan bilgileri Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17 Boru hattına ait uzunluk ve alan bilgileri

Boru Malzemesi	Çapı (D) (m)	Et Kalınlığı	Boy (L) (m)	Yüzey Alanı (m ²) ($\pi \times D \times L$)
ST44 çelik boru	0,6	0,00795 m	12140,33	22872,38

R_{KC} kaplama direnci 5000 Ohm.m² olarak belirlenmiştir.

1 m borunun kaplama direnci;

$$R_{KC1} = \frac{5000}{\pi \times 0,6} = 2652,58 \text{ Ohm.m olarak bulunur.}$$

1 m borunun uzunlamasına direnci;

$$r = \frac{1,8 \cdot 10^{-7}}{\pi \times (0,6 - 0,00795) \times 0,00795} = 1,218 \cdot 10^{-5} \text{ Ohm/m olarak bulunur.}$$

Sönüm sabiti;

$$a = \sqrt{\frac{1,218 \cdot 10^{-5}}{2652,58}} = 6,776 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ olarak bulunur.}$$

Boru hattının karakteristik direnci;

$$R_k = \sqrt{2652,58 \times 1,218 \cdot 10^{-5}} = 0,18 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

4.7.2.3 Akım İhtiyacının Belirlenmesi

Uzun katodik koruma sistemlerinde genel olarak dış akım kaynaklı koruma yöntemi tercih edilir. Galvanik anotlu koruma sisteminde akım maliyeti fazladır. Bu yüzden uzun hatların korunmasında ekonomik olmayabilir.

Sistemimiz dış akım kaynağıyla korunacağından akım ihtiyacı hesapları yardımıyla katodik koruma akım ihtiyacı bulunabilir. Fakat bundan önce ilk olarak Transformatör/Redresör ünitesinin yeri tespit edilmelidir. Arazi incelemeleri neticesinde T/R ünitesine en kolay ulaşımın, AG enerji nakil hattına en yakın mesafenin ve yardımcı anot yatağı için en uygun özgül dirence sahip alanın boru hattının başı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hattın başı ve sonuna izole flanşlarla yalıtım yapılacaktır.

Buna göre bir noktadan tek yöne akım uygulanan sisteme göre katodik koruma akım ihtiyacı hesaplanacaktır. Bu durumda akım gerilim eğrileri hiperbolik olarak azalacaktır.

Katodik koruma kriterlerinin sağlanabilmesi için hat sonundaki potansiyel değişimi $V_S = 0,4$ Volt, akım drenaj noktasındaki gerilim değişimi $V_{DR} = 1,2$ Volt alınabilir.

Bu durumda katodik olarak korunabilecek maksimum boru hattı uzunluğu;

$$L_{maks} = \frac{\cosh^{-1}(1,2 / 0,4)}{6,776.10^{-5}} = 26014,5 \text{ m olarak bulunur.}$$

Korunacak olan boru hattının toplam uzunluğu $12140,33 < 26014,5$ m olduğundan tek katodik koruma istasyonu ile boru hattını korumak mümkündür.

Hat sonundaki gerilim değişimi değeri $0,4$ V alınarak akım drenaj noktasındaki gerilim değişimi bulunarak T/R ünitesinin kademesi bu gerilime göre ayarlanabilir. Bu sayede sisteme fazla gerilim uygulanmamış olur.

$$V_{DRmin} = 0,4 \times \cosh(6,776.10^{-5} \times 12140,33)$$

$$V_{DRmin} = 0,543 \text{ Volt olarak bulunur.}$$

Katodik koruma akım ihtiyacı ise;

$$I_K = (0,4/0,18) \times \sinh(6,776.10^{-5} \times 12140,33)$$

$$I_K = 2,044 \text{ A olarak bulunur.}$$

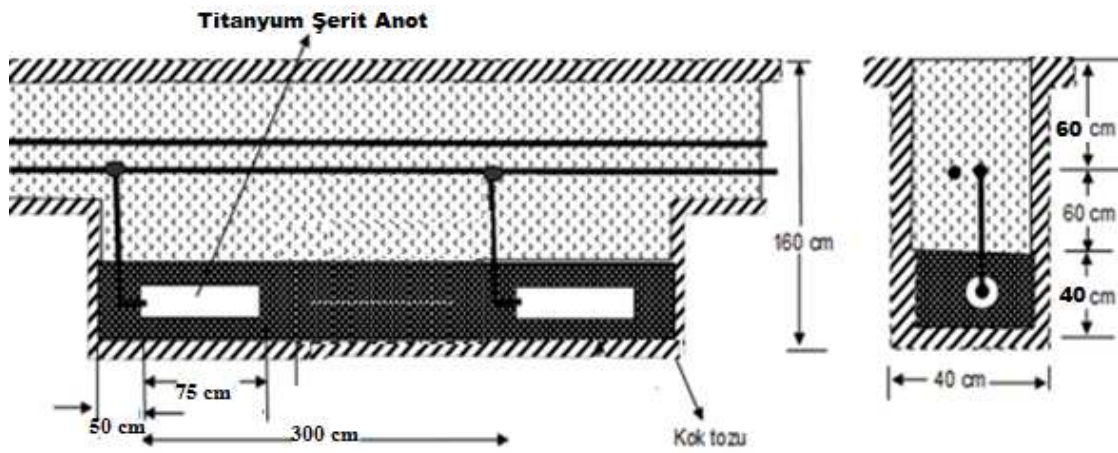
4.7.2.4 Anot Yatağı Tasarımı

İller Bankası dış akım kaynaklı katodik koruma uygulamalarında genel olarak metal oksit kaplı titanyum anotlar veya demir-silikon anotlar kullanılır.

Anot yatağı tasarımı yapılırken hesaplamalarda bulunan akım ihtiyacının % 15 fazlası alınır.

$$I_K = 2,044 \times 1,15 = 2,35 \text{ A}$$

Bir titanyum anottan zemin içerisinde 20 yıllık ömür için 100 A/m^2 akım çekilebilirken, demir-silikon anotlardan 60 A/m^2 akım çekilebilmektedir. Bu tasarımda titanyum şerit anotlar kullanılacaktır.



Şekil 4.17 Yardımcı anot yatağı kesiti

İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde 20 yıl ömür için 100 A/m^2 akım çekilebilen titanyum şerit anodun boyutları $3 \times 20 \times 750 \text{ mm}$, ağırlığı 0,27 kg ve boyutları $3 \times 20 \times 1500 \text{ mm}$, ağırlığı 0,54 kg olarak verilmiştir [23].

$3 \times 20 \times 750$ titanyum şerit anodun yüzey alanı $2 \times 0,02 \times 0,75 = 0,03 \text{ m}^2$ olarak bulunur.

O halde tek anodun verebileceği maksimum akım $I = 100 \times 0,03 = 3 \text{ A}$ olarak bulunur.

Katodik koruma akımını sağlayacak anot sayısı;

$N = 2,35 / 3 = 0,78$ bulunur. Yani tek anot ile ihtiyaç olan akım sağlanır. Fakat tek anotlu sistem için anot yatağı direncinin durumuna bakılmalıdır. Keza anot yatağı direncinin ideal olarak 1 Ohm olması istenir. Yardımcı anotlar $40 \times 40 \text{ cm}$ hacimli ve 50 Ohm.cm özgül dirençli kok tozu dolgusu içine gömülecektir. Anot yatağının yapılacağı zeminin özgül direnci 1041 Ohm.cm olarak ölçülmüştür.

1 Anotlu Anot Yatağı Tasarımı:

Titanyum şerit anotların eşdeğer yarıçapı bulunurken şerit anodun yüzey alanı titanyum tüp anodun yüzey alanına eşitlenir.

$$2 \times 2 \times 75 = \pi \times d \times 75$$

d= 1,27 cm olarak bulunur.

Anot yatağının efektif çapı;

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{40 \times 40}{\pi}} = 45,13 \text{ cm olarak bulunur.}$$

Anot yatağı dolgu boyu ise;

$$L = 2 \times 50 + 1 \times 75 = 1,75 \text{ m}$$

$$R_{iç} = \frac{50}{2 \times \pi \times 75} \left[\ln \left(\frac{4 \times 75^2 + 4 \times 75 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 75^2}}{1,27 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{75} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 75^2}}{75} - 1 \right) \right]$$

$R_{iç} = 0,486 \text{ Ohm}$ olarak bulunur.

$$R_{yatay} = \frac{1041 + 50}{2 \times \pi \times 175} \left[\ln \left(\frac{4 \times 175^2 + 4 \times 175 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 175^2}}{45,13 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{175} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 175^2}}{175} - 1 \right) \right]$$

$R_{yatay} = 2 \text{ Ohm}$ olarak bulunur.

$R_{eş} = 2 + 0,486 = 2,486 > 1 \text{ Ohm}$ olup bir anotlu tasarım uygun değildir.

5 Anotlu Anot Yatağı Tasarımı:

Anot yatağı dolgu boyu;

$$L = 2 \times 50 + 5 \times 75 + (5-1) \times (300-75) = 1375 \text{ cm}$$

$$R_{yatay} = \frac{1091}{2 \times \pi \times 1375} \left[\ln \left(\frac{4 \times 1375^2 + 4 \times 1375 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 1375^2}}{45,13 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{1375} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 1375^2}}{1375} - 1 \right) \right]$$

$R_{yatay} = 0,65 \text{ Ohm}$ olarak bulunur.

$$F_A = 1 + \frac{50}{\pi \times (300 - 75) \times 0,486} \times \ln(0,656 \times 5) = 1,2 \text{ olarak bulunur.}$$

$$R_{eş} = 0,65 + \left(\frac{0,486}{5} \right) \times 1,2 = 0,77 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Bulunan toplam eşdeğer direnç 1 Ohm değerinde düşüktür. Fakat zemin direncinin mevsimsel değişikliklerde artabileceği ve katodik koruma devre dirençleri de göz önünde bulundurarak 10 adet anot için yeniden hesaplamalar yapılacaktır:

Anot yatağı dolgu boyu;

$$L = 2 \times 50 + 10 \times 75 + (10-1) \times (300-75) = 2875 \text{ cm}$$

$$R_{yatay} = \frac{1091}{2 \times \pi \times 2875} \left[\ln \left(\frac{4 \times 2875^2 + 4 \times 2875 \sqrt{(2 \times 160)^2 + 2875^2}}{45,13 \times (2 \times 160)} \right) + \left(\frac{(2 \times 160)}{2875} - \frac{\sqrt{(2 \times 160)^2 + 2875^2}}{2875} - 1 \right) \right]$$

$$R_{yatay} = 0,4 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

$$F_A = 1 + \frac{50}{\pi \times (300 - 75) \times 0,486} \times \ln(0,656 \times 10) = 1,3 \text{ olarak bulunur.}$$

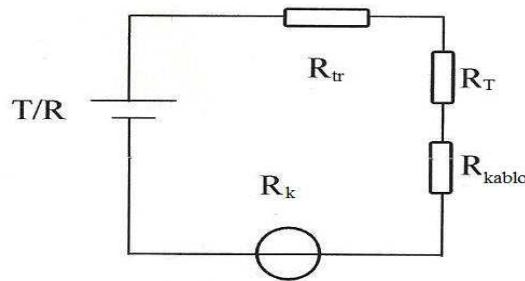
$$R_{eş} = 0,4 + \left(\frac{0,486}{10} \right) \times 1,3 = 0,46 \text{ Ohm olarak bulunur.}$$

Bu değer 1 Ohm değerinden düşük olup mevsimsel direnç artışları ve diğer katodik koruma devresi dirençleri de düşünülerek anot yatağı 10 anotlu olarak tasarlamak uygun olacaktır.

4.7.2.5 Transformatör/Redresör Ünitesinin Tasarımı

Transformatör/Redresör ünitesinin tasarımında tasarım akımı olarak katodik koruma akımının % 25 fazlası alınabilir.

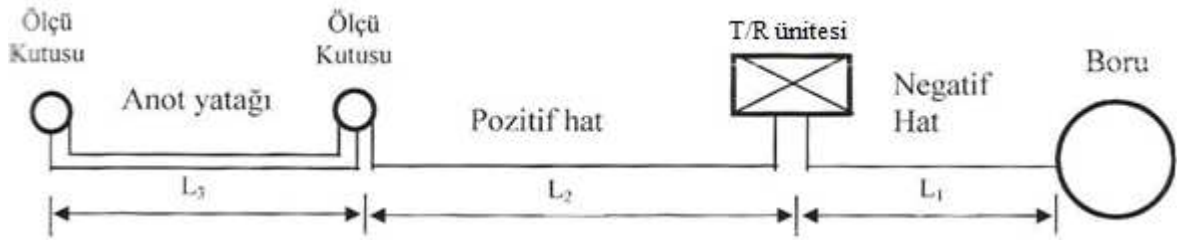
$$I_{tasarım} = 2,35 \times 1,25 = 2,94 \text{ Amper}$$



Şekil 4.18 Katodik koruma devresinde dirençler

R_{tr} ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

- $R_T = 0,46$ Ohm
- $R_k = 0,18$ Ohm
- R_{kablo} : Sistemdeki kabloların toplam direnci (Ohm)



Şekil 4.19 Katodik koruma istasyonunda kablolar

$$L_1 = 15 \text{ m, } 1 \times 16 \text{ mm}^2 \text{ NYY}$$

$$L_2 = 120 \text{ m, } 1 \times 16 \text{ mm}^2 \text{ NYY}$$

$$L_3 = 100 \text{ m, } 1 \times 16 \text{ mm}^2 \text{ EPR/CSPE}$$

$$L_T = 235 \text{ m } 1 \times 16 \text{ mm}^2 \text{ NYY, EPR/CSPE}$$

$$R_3 = 235 / (56 \times 16) = 0,26 \text{ Ohm}$$

$$R_{\text{tasarım}} = 0,46 + 0,18 + 0,26 = 0,9 \text{ Ohm}$$

T/R ünitesinin gerilim kapasitesi;

$$V_{T/R} = I_{\text{tasarım}} \times R_{\text{tasarım}} \quad (4.28)$$

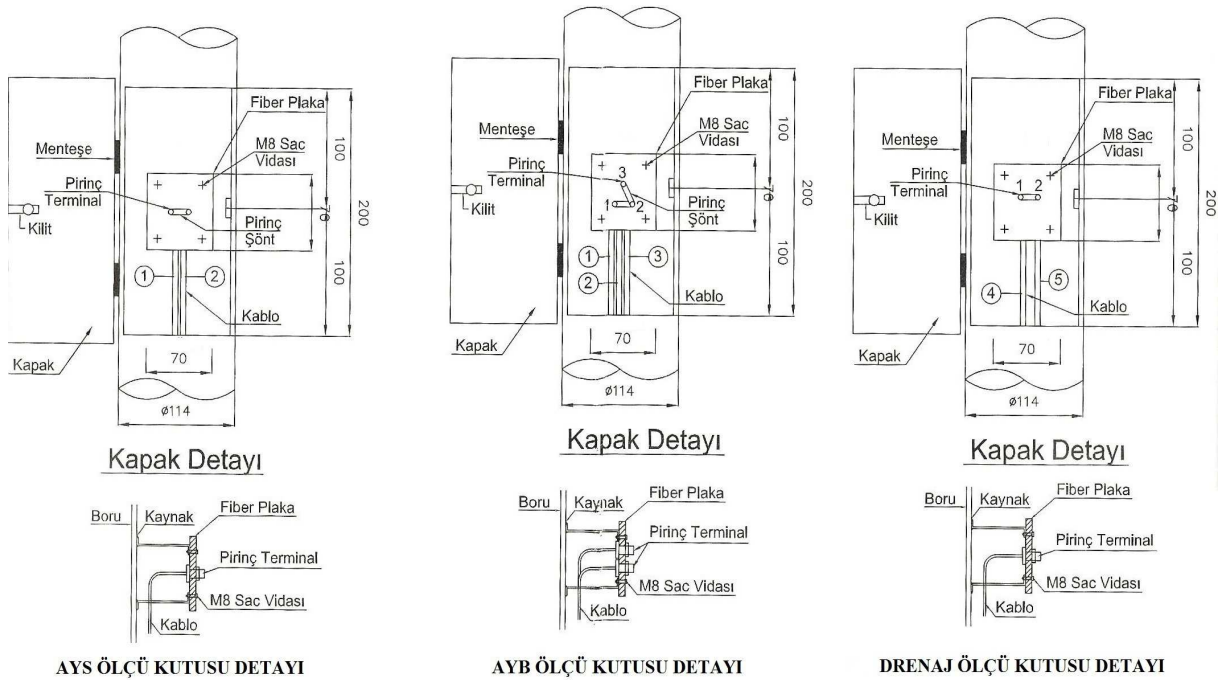
$V_{T/R} = 2,94 \times 0,9 = 2,65$ Volt olarak bulunur. İller Bankası Teknik Şartnamesi'ne göre 60 V, 50 A, 3 kVA, otomatik ve manuel çalıştırılabilen T/R ünitesi yeterlidir. Üretici firma kataloglarına göre istenen akım ve gerilim değerlerini sağlayan ünitelerde kullanılabilir.

4.7.2.6 Diğer Malzemelerin Seçimi

Katodik koruma akımının toprağa deşarjını ve anotların öngörülen ömürden daha kısa sürede tükenmesini önlemek amacıyla boru hattının başlangıç ve bitiş noktaları izole flanş ile yalıtılmalıdır. İzole flanş İller Bankası teknik Şartnamesi'ne uygun olmalıdır (Şekil 4.15).

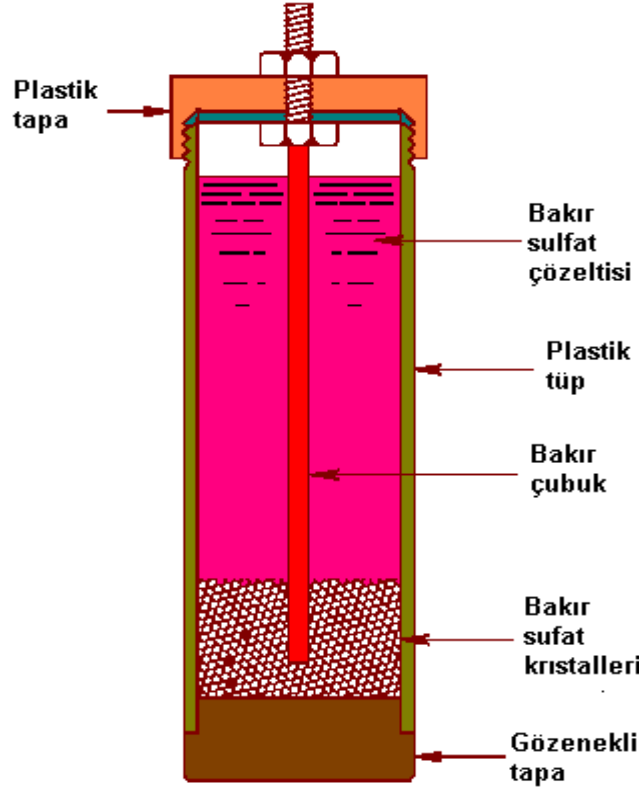
Sistemde kullanılacak ölçü kutuları galvanik anotlu sisteme göre daha çeşitlidir. Tesislerde değişik maksatlar için ölçü kutusu bulunabilir, dış görünüm hepsinde aynıdır. Ölçü kutusunun kapağı içindeki ölçüm hücresinde, kullanım şekline göre pirinç kutuplar bulunur. Borudan, anotlardan veya redresör ünitesinden gelen kablolar ölçü kutusuna alttan girecek ve beton temel, zamanla oturmasından dolayı kabloları ezmeyecektir. Montajda kabloların zarar görmemesini için kablolar PVC boru içinden geçirilerek koruma altına alınacaktır. Boru hattı üzerinde aşağıdaki ölçü kutuları kullanılacaktır (Şekil 4.20, Şekil 4.21).

- **AYB ölçü kutusu:** Anot yatağı başında kullanılacaktır. Anot yatağının redresör tarafındaki ölçü kutusu olup redresörden gelen (+) kablosu, anot dizisi kablosu ve ring kablosu bulunur.
- **AYS ölçü kutusu:** Anot yatağı sonunda kullanılacaktır. Yatay anot yataklarında kullanılır ve anot dizi kablosu ile ring kablosu bulunur.
- **Drenaj ölçü kutusu:** Boru hattının DC besleme noktasında kullanılacak olup, redresörden gelen (-) kablosu ile borudan gelen kablo bu ölçü kutusu içinde şöntlenir.
- **Hat ölçü kutusu:** Boru hattı güzergâhında her kilometrede bulunan, sadece boru / toprak potansiyelinin ölçümü için kullanılır ve içinde borudan gelen kablo bulunur. Kablo tipi olarak $1 \times 10 \text{ mm}^2$ NYY kablo kullanılacaktır.



Şekil 4.20 AYS, AYB ve Drenaj ölçü kutuları detayları

T/R ünitesi içerisinde yer alan elektronik kontrol kartının akım drenaj noktasındaki gerilim ve akım değerlerini bakır / bakır sülfat elektroduna göre okuyabilmesi için T/R ünitesinin yakınına 1 adet bakır / bakır sülfat elektrodu bağlanmalıdır (Şekil 4.22). Böylece T/R ünitesinin otomatik devreye girip çıkması için gerekli olan akım ve gerilim değerleri elde edilmiş olur.



Şekil 4.22 Bakır / bakır sülfat elektrodu

Anot yatağı ve T/R ünitesinin görünüşü Şekil 4.23’de verilmiştir.

4.7.2.7 Metraj Listesi

Metraj listesi Çizelge 4.19’ da verilmiştir.

Çizelge 4.19 Metraj listesi

Sıra No	Malzeme Cinsi	Miktarı
1	Otomatik –Manuel harici tip 60 V/50 A T/R Ünitesi	1 adet
2	Karma metal oksit kaplı titanyum şerit anot	10 adet
3	Ek mufu	10 adet
4	Termit kaynak	14 adet
5	1×10 mm ² NYY (Hat ölçü kutuları)	150 metre
6	1×16 mm ² EPR/CSPE kablo (Anot yatağı)	100 metre
7	1×16 mm ² NYY (T/R ünitesi-Anot yatağı)	135 metre
8	2×6 mm ² NYRY (Enerji girişi)	100 metre
9	Topraklama elektrodu	1 adet
10	Ø 500’den yukarı izole flanş	2 adet
11	Bakır / bakır sülfat referans elektrodu	1 adet
12	Ölçü kutusu (AYS, AYB, Drenaj, Hat)	16 adet
13	Kok tozu dolgu maddesi (28,75×0,4×0,4= 4,6 m ³)	4,6 ton

Kandıra Namazgâh Barajı Terfi Hattı kapsamında kullanılan çelik yer altı boru hattı katodik olarak korunmaz ise ortalama özgül direnci 1882 Ohm.cm olan bir zemin içerisinde çelik borular Çizelge 4.1’e göre 7-10 mm/yıl korozyon hızı ile korozyona uğrayacaktır. Ø 600 çelik borunun et kalınlığı yaklaşık 7 mm olup katodik koruma yapılmaması durumunda boru hattında 0,7–1 yıl içerisinde korozyonun sebep olduğu delinmeler başlayacaktır.

KATODİK KORUMA TESİSLERİNDE İŞLETME VE BAKIM

Büyük emek ve ödemeler sonucunda kurulan katodik koruma tesislerinde iş bitiminden sonra gerekli sıklıklarda kontrollerin yapılması gerekir. Aksi takdirde çok basit arızalar sonucunda katodik koruma sistemi devre dışı kalabilir. Fakat bunun tespiti ancak katodik olarak korunan metal yapıların potansiyel ölçümleri sonucunda anlaşılabilir. Fark edilmeyen arızalı süre içerisinde sözde korunduğu düşünülen metal yapı hızla korozyona uğrar. Katodik koruma sistemleri üzerinde etkin ve rasyonel bir koruma, ancak periyodik aralıklarla işletme kontrollerinin devamlı olarak yapılması ile mümkün olabilir [19].

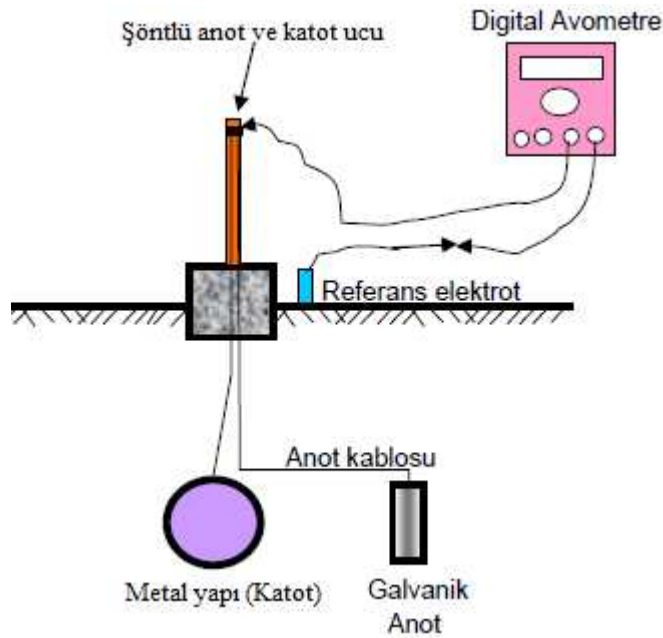
Katodik korumanın işletme ve bakım kontrollerinin periyodik olarak yapılmaması halinde katodik koruma sistemi etkisini yitirir. Zira katodik koruma sistemi toprak veya deniz altında bulunan metal yapılara uygulanmış olup, sistemin çalışması veya arıza yapması durumu ile ilgili olaylar gözle görülemeyecek şartlar altında meydana gelir. İşletme ve bakım kontrolleri periyodik olarak yapılmayan ve arızalardan dolayı devre dışı kalan bir katodik koruma sisteminin uygulandığı metal yapılar, kısa sürede zarar görerek tahrip olabilir. Bu nedenle, sistemin devrede veya devre dışı kaldığını tespit edebilmek için, mutlaka periyodik olarak işletme ve bakım kontrollerinin yapılması gerekir. Periyodik olarak yapılacak işletme ve bakım kontrolleri, katodik koruma yapılan boru hattının ömrünü uzatacağı gibi, işletme için yapılacak harcamaları da asgari düzeye indirecektir.

5.1 Galvanik Anotlu Tesislerde İşletme ve Bakım

Galvanik anotlu sistemde işletme ve bakım son derece kolaydır. Korumayı sağlayan anotlar devre dışı kalmadığı sürece herhangi bir bakım işi ortaya çıkmaz. Bu sistemin ölçüm ve kontrollerinin yılda dört defa (İlkbahar, yaz, sonbahar ve kış aylarında) yapılması yeterlidir. Bu ölçümler 1 adet avometre ve bir adet Cu/CuSO_4 referans elektrodu kullanılarak yapılır.

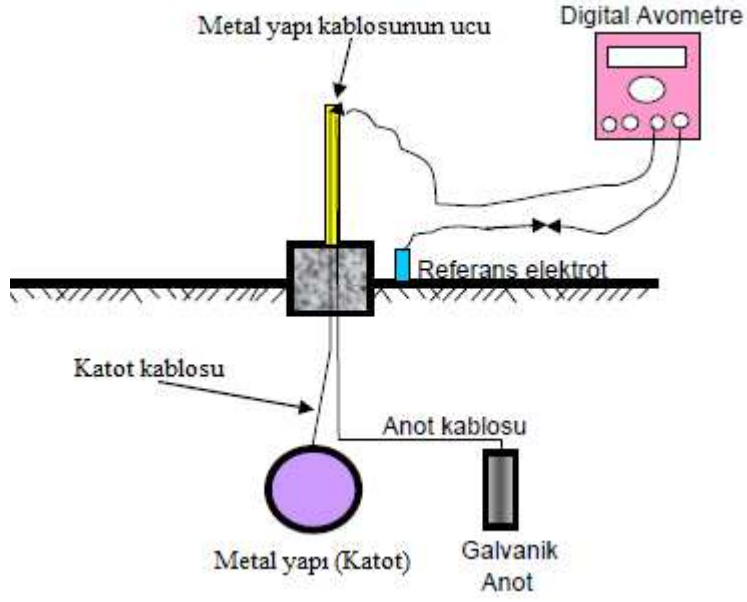
Referans elektrodu yalnız potansiyel ölçümünde kullanılır, akım ölçümünde kullanılmaz. Sağlıklı ölçüm yapılabilmesi ve omik dirençten dolayı gerilim düşümü olmaması için, referans elektrodunun metal yapının üzerine veya azami 50 cm yakınına konulması gerekir. Eğer referans elektrodunun konulduğu yani toprağa temas ettirildiği kısım kuru ise, toprak ile elektriksel devreyi tamamlamak için toprağa bir miktar su dökülmelidir. Galvanik anotlu sistem için yapılan başlıca ölçüm çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

- Sistem / Toprak potansiyeli (mV): Ölçü kutusundaki şönt iki kutba bağlı vaziyette yapılır. Okunan bu değer anodun boruya bağlı vaziyette olduğu, yani borunun galvanik olarak korunduğu vaziyetteki sistemin/toprağa göre (Korunan metal yapının / toprağa göre) okunan potansiyel değeridir. Avometrenin kademesi 2 mV değerinde ve referans elektrodu toprağa gömülü şekilde yapılır.



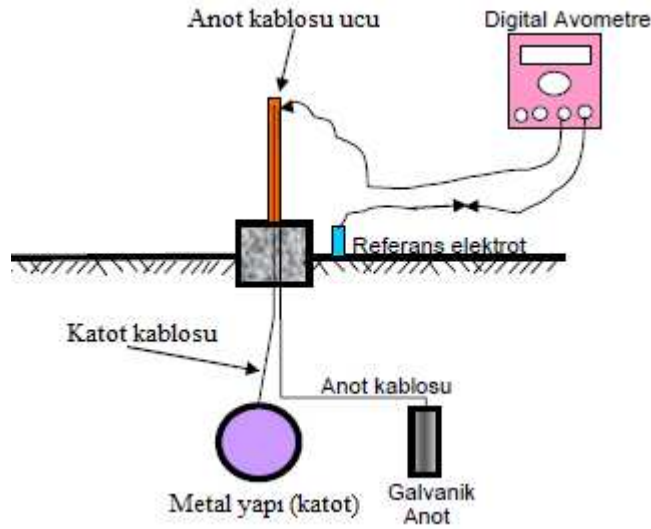
Şekil 5.1 Sistem / toprak potansiyelinin ölçülmesi

- Metal Yapı / Toprak potansiyeli (mV): Ölçü kutusunun kapağı açılır, şönt sökülür. Düşük okunan değer bu değer olup, metal yapıya anot bağlı olmadan, yani metal yapı korunmadan okunan metal yapının tabii potansiyel değeridir. Avometrenin kademesi 2 mV değerinde ve referans elektrodu toprağa gömülü şekilde yapılır.



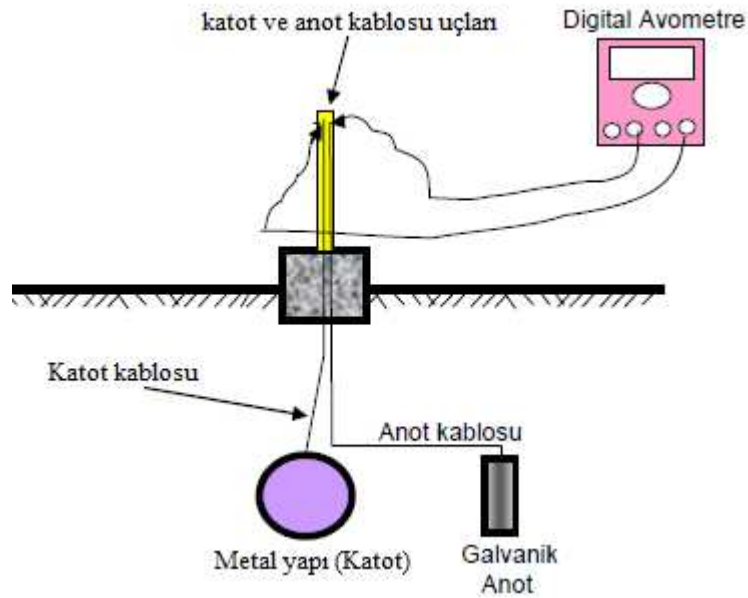
Şekil 5.2 Metal yapı / toprak potansiyelinin ölçülmesi

- Anot / Toprak potansiyeli (mV): Ölçü kutusundaki şönt açık vaziyette yapılır. Yüksek okunan değer bu değer olup, anot boruya bağlı olmadan, yani anodun gömülü olduğu toprağa göre okunan potansiyel değeridir. Avometrenin kademesi 2 mV değerinde ve referans elektrodu toprağa gömülü şekilde yapılır.



Şekil 5.3 Anot / toprak potansiyelinin ölçülmesi

- **Anot Akımı (mA):** Ölçü kutusundaki şönt açık vaziyette yapılır. Okunan bu değer anotdan çekilen akım miktarını gösterir. Bu değer büyük ve küçük oluşu, metal yapı kaplamasının iyi veya bozuk olmasına ve anodun gömüldüğü yerin uygun dirençte olmamasına, anot montajı esnasında anot etrafının gevşek bırakılıp bırakılmamasına bağlıdır. Kaplama iyi ise anottan çekilen akım gittikçe azalır. Metal yapı polarize olur. Anot uygun dirençteki yere gömülmemiş veya etrafı gevşek bırakılıp, sulanmamış ise, anot akım çıkışı veremez. Avometre mA kademesinde, avometrenin ortak ucu ve diğer ucu, ölçü kutusu içerisindeki kutuplara değiştirilerek ölçüm yapılır. Aletin hangi kablo ucunun hangi kutba değdiği önemli değildir. Bu ölçüm esnasında referans elektrodu kullanılmaz. Okunan değer mA cinsinden olup, 4 ile 100 mA arasında çeşitli değerlerde okunur.



Şekil 5.4 Anot akımının ölçülmesi

Ölçüm sonuçları aşağıdaki gibi değerlendirilebilir.

- Ölçümler neticesinde voltmetreden pozitif değer okunmaması gerekir. Eğer pozitif değer okunuyorsa test bağlantılarının doğru polaritede bağlanıp bağlanmadığı kontrol edilir. Doğru akım ölçme konumuna alınan voltmetrenin negatif ucu bakır / bakır sülfat referans elektroduna, pozitif ucu da borudan gelen kabloya bağlı test kutusu terminaline bağlanır. Eğer hala pozitif değer okunuyorsa bu durumda boru hattını etkileyen kuvvetli bir interferans olduğu düşünülebilir.

- Ölçülen anot potansiyeli 1500-1600 mV değerlerinde ise anot potansiyelinin koruma için yeterli olduğu kanısına varılabilir. Anot potansiyeli 800-900 mV ölçülmüş ise anot bitmiş demektir.
- Anot akımı 4-20 mA arasında bir değerde ve sistem potansiyeli 850 mV'un üzerinde bir değerde ise katodik koruma sistemi yeterli çalışıyordur. Akım değeri 80-100 mA değerleri arasında ise anottan aşırı akım çekiliyordur.
- Sistem potansiyeli negatif yönde 850 mV değerinin altında (Örneğin 700 mV) okunmuşsa ve anot potansiyelleri de 850 mV değerinin üzerinde ise, bu durumda anotların akımlarına bakmak gerekir. Eğer anotlardan akım çekilemiyorsa bu durumda katottan gelen kablo kopmuş demektir. Bu durumda kablonun nereden koptuğu kazılarak tespit edilir. Metal yapının irtibat kablosu kopmuş ise, metal yapı üzerine termit veya gümüş kaynağı ile yeniden kaynatılır.
- Sistem potansiyeli 850 mV değerinin altında okunmuş ise ve anot potansiyelleri de 850 mV'un altına düşmüşse, bu durumda anotların akımlarına bakılır. Eğer anotlardan hiç akım okunamıyorsa, anotlardan gelen kablolar kopmuş demektir. Bu durumda kablonun nereden koptuğu kazılarak tespit edilir. Kablo anodun kaynak yerinden kopmuş ise, kablo yeniden termit veya gümüş kaynağı ile yeniden kaynatılır. Kopuk kablonun gövdesinde meydana gelmiş ise, anot kabloları mekanik olarak daha kalın kesitli kabloyla değiştirilir. Eğer kablolarda bir kopuk yok ise ve anot potansiyeli de düşük ise anot ömrünü tamamlamış demektir.
- Anottan çekilen akım beklenenden daha az ise anot çevresindeki zemin kurumuş ve anot direnci artmış olabilir ya da eğer paralel bağlanmış anotlardan oluşan bir anot grubu varsa bu anot grubundaki anotlardan bazıları devre dışı kalmış olabilir.
- Anot akımı yüksek olduğu halde sistem/toprak potansiyeli 850 mV değerinden düşük ise metal yapıya izole flanşsız yeni bir metal yapı eklendiği, sistemde kullanılan izole flanş gibi yalıtım malzemelerinin direncini kaybettiği, kaplamanın bozulması sonucu akım ihtiyacının artmış olabileceği, mevsimsel etkiler veya başka nedenlerden ötürü zemin yapısının (özgül direnç, rutubet oranı, vb.) değişebileceği gibi hususlar araştırılarak arızanın sebebi tespit edilmeye çalışılır.

- Yeni katodik koruma sistemlerinde bir ölçü kutusundan normal alınan değerlerin aniden düşük okunması durumunda, referans elektrotundan şüphelenmek gerekir. Bu durumda aynı okumaları başka bir referans elektroduyla yapmalı eğer bu şekilde yapılan ölçüm değerleri normal ise referans elektrodu arızalanmış demektir. Bu durumda referans elektrotlarının kontrolü gerekir. Kablo ek yerleri kontrol edilir. Eğer kablo ek yeri sağlam ise, referans elektrotunun içerisi açılarak eriyik kontrol edilir. Eksik ise doldurulur. Gerekli testleri yapıldıktan sonra tekrar ölçüm yapılır.
- Çok eskiden uygulanmış, akım kaçağı çok olan ve koruma süresini doldurmuş katodik koruma sistemlerinde bir ölçü kutusundan normal alınan değerlerin aniden düşük okunması durumunda büyük bir olasılıkla anotlar ömürlerini doldurmuş demektir. Bu durumda anotların katodik koruma tatbikat projesine uygun olarak yenilenmesi gerekir.

5.2 Dış Akım Kaynaklı Tesislerde İşletme ve Bakım

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde ilk olarak T/R ünitesinin devreye alınması gerekir. T/R ünitesinin ayarının yapılmasında aşağıdaki kurallara uyulmalıdır.

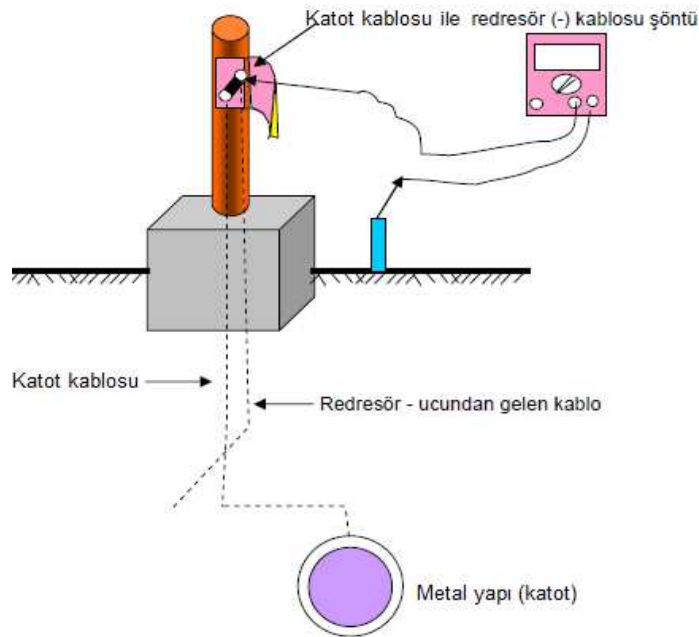
- Redresör çıkışındaki (+) ucun anoda (-) ucun katoda yani katodik olarak korunacak metal yapıya bağlanmalıdır. Bu bağlantılarda gevşeklik olmamalıdır.
- Redresöre akım uygulamadan önce trafo çıkış kabloları, pano şalter girişleri ve diğer ark yapabilecek bağlantılar kontrol edilmelidir.
- Potansiyel kademesi minimumda iken sisteme enerji verilir. Bu durumda, çıkış potansiyeli ve sisteme uygulanan akım şiddeti ölçülür. Daha sonra sisteme verilen akım kademeli olarak artırılır. Her kademede çıkış potansiyeli ve akımı ile korunacak sisteme ait sistem / toprak potansiyelleri ölçülür. Bu değerler akım drenaj noktasından en uzak yerde bulunan ölçü kutusunda doymuş bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre - 850 mV değerinden daha negatif bir değerde olmalıdır. Fakat bu değeri tutturmak için T/R ünitesi fazla zorlanmamalıdır. Ayrıca akım drenaj noktasında sistem / toprak potansiyelinin 2000 mV'u aşmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde boru kaplamasında soyulmalar meydana gelmeye başlayacak ve buna bağlı olarak katodik koruma akım ihtiyacı artarak katodik koruma sistemi yetersiz hale gelecektir.
- İlk ayar yapıldıktan sonra 1 hafta süreyle her gün sistem kontrol edilerek duruma göre yeniden ayar yapılmalıdır. Katodik koruma sistemi bir süre çalıştıktan sonra akım

ihtiyacındaki değişmeler durma aşamasına gelir. Bu durumda katodik koruma sistemi kararlı hale gelmiş olur.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde sistem devreye alındıktan itibaren ilk ay içerisinde haftada bir, üç ay içerisinde on beş günde bir, daha sonraki süreçte ise ayda bir kontroller yapılmalıdır. Başlangıçta yapılan bu kontroller sistemim akım ve potansiyel ayarının yapılabilmesi için gereklidir. Bu dönemden sonra sistem kararlı hale gelir. Bir yıldan sonra ise kontroller üç ayda bir yapılması yeterlidir. Kontrollerin daha sık yapılması koruma sistemindeki bir sorundan dolayı koruma sisteminin uzun süre devre dışı kalmasını önlemek açısından faydalı olacaktır.

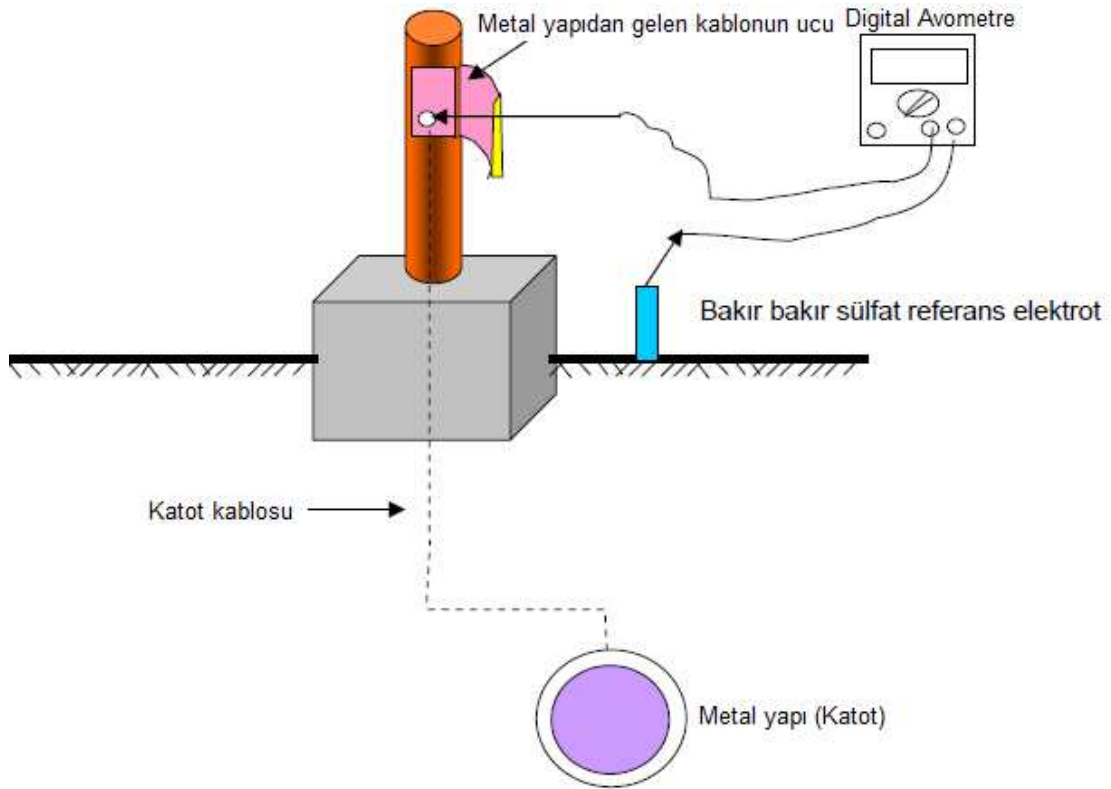
Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin periyodik kontrollerinde yapılan ölçümler aşağıda sıralanmıştır.

- Dış akım kaynaklı sistemde polarite tayinin düzgün yapılması gerekir. Polarite bağlantısı ters yapılırsa korunması gereken metal yapı anot, yardımcı anotlar ise katot durumuna geleceğinden metal yapı hızla korozyona uğrayacaktır. Polarite kontrolü yapılırken avometrenin (+) ucu referans elektroda, (-) ucu ölçü kutusundaki pirinç vidaya temas ettirilir. Bu durumda avometrenin ekranından negatif bir değer okunmuyorsa redresör çıkış bağlantıları doğru yapılmıştır. Ekranda negatif bir değer okunuyorsa redresör çıkış bağlantı uçları değiştirilmelidir.



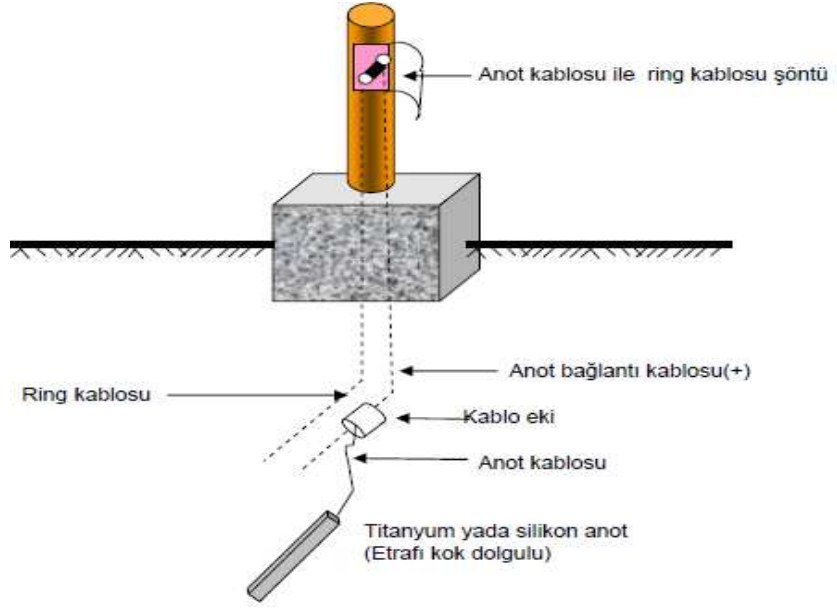
Şekil 5.5 Polarite tayini ve akım drenaj noktası potansiyelinin belirlenmesi

- Akım drenaj noktasında bulunan drenaj ölçü kutusunda Şekil 5.5'deki gibi bağlantılar yapılarak akım drenaj noktasındaki sistem potansiyeli okunabilir. Tercihen bu potansiyel değerinin 2000 mV'un üzerinde olmamalıdır. Bu ölçüm kurak bir zeminde yapılıyorsa daha sağlıklı ölçüm yapabilmek için zemine bir miktar su dökülmelidir.
- Hat ölçü kutusundan ölçüm yapılırken Şekil 5.6'daki bağlantılar yapılır. En son hat ölçü kutusunda ölçülen potansiyel değeri minimum 850 mV olmalıdır. Eğer ortam bataklık ise bu değer minimum 950 mV olmalıdır.

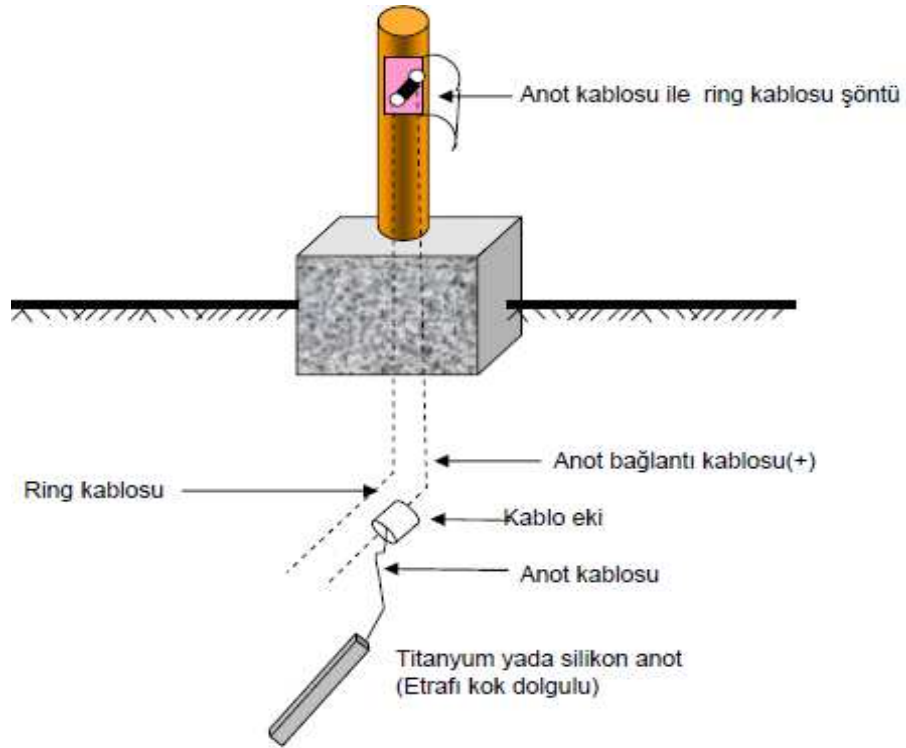


Şekil 5.6 Hat ölçü kutusu bağlantı şeması

- Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde galvanik anotlu sisteme göre aynı görünüme sahip, fakat farklı bağlantıları olan ölçü kutuları vardır. Bunlar anot yatağı başına ve sonuna, akım drenaj noktasına, metal yapı boyunca hat üzerine monte edilirler. Hat ölçü kutularının bağlantı şeması Şekil 5.6'da, drenaj ölçü kutusunun bağlantı şeması Şekil 5.5'de verilmiştir. Anot yatağı sonu ve anot yatağı başı ölçü kutularının bağlantı şemaları ise sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir.

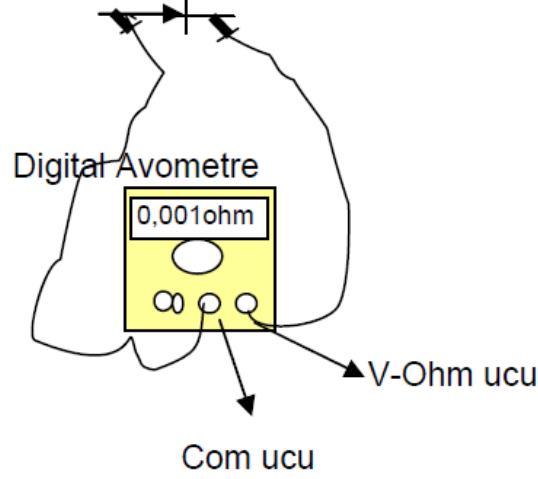


Şekil 5.7 Anot yatağı sonu ölçü kutusu bağlantı şeması



Şekil 5.8 Anot yatağı başı ölçü kutusu bağlantı şeması

- Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminde en sık görülen arızalar T/R ünitesinde meydana gelir. Bu arızaların başında köprü diyot arızaları ilk sırada yer alır. Söz konusu diyotların arızalı olup olmadığını avometrenin Ohm soketini kullanarak tespit etmek mümkündür. Şekil 5.9'daki gibi bağlanan test devresinde diyot uçları ölçü propları ile temas ettirilir ve avometreden 400-500 Ohm değeri okunursa diyotlar sağlam demektir.



Şekil 5.9 Diyot test devresi bağlantı şeması

- T/R ünitesinden normalden daha fazla akım çekilmesine rağmen potansiyel değeri normal ise bu duruma izole flaşlardan birinin görevini yapmadığı, çevredeki diğer metal yapıların kaçak akım etkilerini olduğu, metal yapıya ilave yapılmış olması ve metal yapının kaplamasının zarar görmüş olması gibi sorunlar neden olabilir.
- T/R ünitesinin potansiyeli normal iken akımın normalden daha az olması durumu anot yatağındaki bazı anotların devre dışı kalması ya da anot yatağının kuruması gibi sorunlardan kaynaklanabilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Korozyonun ekonomimize olan zararı 45,6 milyar dolar olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yurtdışında, özellikle ABD’de her yıl güncellenerek yapılmaktadır. Bu rakam 276 milyar dolar olarak hesaplanmıştır. Yine ABD’de Savunma Bakanlığı ve Amerikan Ordusu bu konuda literatüre girecek çalışmalar yapmaktadırlar. Özellikle petrol taşıma hatları ile gemi ve limanlara yönelik olarak geniş çaplı araştırmalar yapılmıştır. Büyük petrol firmaları da bu konuda akademik çalışmalara destek vermektedirler. Ülkemizde de yine petrol firmalarının bu konuda ilgili bölümleri mevcuttur.

Korozyonla mücadele etmek üzere çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Ortamın yapısına göre dayanıklı malzeme kullanarak, metal yüzeyini kaplayarak, çevrenin koroziflik etkisini giderecek şekilde ortama kimyasal madde ekleyerek ve katodik koruma yaparak korozyonla mücadele etmeye çalışılmaktadır.

Korozyonla mücadelenin en etkin yöntemi olan katodik koruma eksik veya yanlış uygulanması durumunda, uygulanmaması halinden daha kötü sonuçlar doğurabilir. Teorik olarak çok kolay olan katodik korumanın uygulamasında zaman zaman çeşitli sorunlar yaşanmaktadır. Bu nedenle katodik koruma tasarımlarının mutlaka temel teorik bilgiler ve standartlara göre hazırlanması gerekmektedir.

Katodik koruma konusu Elektrik Mühendisliği alanında özel bir konu olmakla birlikte disiplinler arası bir alana giren bir konudur. Özellikle ekonomiye olan etkisi nedeniyle yurtdışı örnekleri ve özel şirketlerin çalışmaları incelenerek yeni koruma malzemeleri ya da mevcut malzemelerin iyileştirilmesi sağlanabilir. Bugün ülkemizde anot üretilebiliyorsa da özellikle Bakü-Tiflis-Ceyhan boru hattı gibi önemli projelerde yurtdışından gelen malzemelerin kullanılıyor olması bu konuda daha fazla çalışılması gerektiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] Odabaşı, T., (2004). Katodik Koruma Sisteminin Tanıtımı, http://www.etmd.org.tr/teknik_yazilar.php, 11 Aralık 2012.
- [3] Abu H.T., (1998). Çeliğin Zemin İçindeki Korozyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [4] Mutlu, Y., (2010). İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Katodik Koruma Uygulamaları ve Ekonomik Analiz, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Üneri, S., (2000). Korozyon ve Önlenmesi, 2. Baskı, Korozyon Derneği Yayınevi, Ankara.1998.
- [6] Çakır, A.F., (2012). “Metallic Corrosion Losses Of Turkey”, The European Corrosion Congress, 09-13 Eylül 2012, İstanbul.
- [7] Metin, E., (2007). Katodik Koruma Sistemleri, Yeni Uygulamalar ve Ekonomik Analiz, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Dwight, H.B., (1936). Calculation Of Resistances To Ground, Transactions Of The American Institute Of Electrical Engineers, 1319-1328.
- [9] 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 Mayıs 2011, Elazığ, 436-441.
- [10] Görenler, A., (2007). Al-Si Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi’, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Yalçın, H., Koç, T., (1999), Katodik Koruma, Palme Yayınları, Ankara.
- [12] TS 5141, (1987). Yeraltı Çelik Boru Hatlarının Katodik Korunması Kuralları, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [13] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, MEGEP, Korozyon ve Katodik Koruma, <http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/kimya/moduller/KorozyonVeKatodikKoruma.pdf> , 30 Ocak 2013.
- [14] Demir, M., Redoks Titrasyonları, <http://web.adu.edu.tr/user/mdemir/K214/K21417red>

[oksgiris090406.pdf](#), 11 Şubat 2013.

- [15] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Yükselgenme-İndirgenme Reaksiyonları, http://www.meb.gov.tr/aok/aok_kitaplar/AolKitaplar/Kimya_6/2.pdf, 17 Şubat 2013.
- [16] AR Metal Katodik Koruma Sanayi, Katodik Koruma Bilgileri, <http://www.arkatodikkoruma.com/faydali-bilgiler/katodik-koruma-bilgileri>, 9 Ocak 2013.
- [17] Akkum, V., (2006). Galvanik Anotla Yapılan Katodik Koruma Uygulamalarında Anot Verimliliğinin Belirlenmesi ve Ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [18] İşdaş, O., Kaçak Akım Korozyonu Etkileşim, <http://www.spmuhendislik.com.tr/katodikkorumamakale/Etkilesimkacakakimkorozyonu.pdf>, 17 Şubat 2013.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Esen Metal, Ürünler; <http://www.esenmetal.net/urunler.htm>, 25 Kasım 2012.
- [22] TS 9234, (1991). Katodik Koruma-Galvanik Anotlar, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [23] İller Bankası, (2005). Katodik Koruma Proje ve Tesisinin İnşaatına Ait İller Bankası Özel ve Teknik Şartnamesi.
- [24] 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.
- [25] Akat Mühendislik, Katodik Koruma Malzemeleri, <http://www.akat.net/sistemler.html>, 10 Şubat 2013.
- [26] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (2008). Çelik Boru Şartnamesi, DSİ, Ankara.
- [27] Odabaşı, T., (2005). Boru Hatlarında Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sisteminin Hesabı, Botaş Yayınları.
- [28] Yavuz H., (2001). “Katodik Koruma Proje Hesapları”, İller Bankası Genel Müdürlüğü İçmesuyu Dairesi Başkanlığı İçmesuyu ve Arıtma Tesisi İnşaatlarında Sözleşme Uygulamaları Semineri, Ankara.
- [29] Kortek Mühendislik, Our Product Line, <http://www.kortek.com.tr>, 18 Nisan 2013.
- [30] Ürgüplü, Z., (2008). Elektrobak, 2. Baskı, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- [31] Na-Ka Katodik Koruma Sanayi ve Tic. Ltd. Şti., Ürünlerimiz, <http://www.naka.com.tr>, 20 Nisan 2013.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Gökhan BIYIK
Doğum Tarihi ve Yeri :20.07.1987 Sivas
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :gbiyik@ilbank.gov.tr, gkhnbyk@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Sivas Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011 -	İller Bankası Anonim Şirketi	Teknik Uzman Yardımcısı