

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

79130

**HALIÇ KÖPRÜSÜNÜN TAŞIYICI KAZIKLARININ
ELEKTROKİMYASAL KOROZYONUNUN ETÜD
EDİLMESİ VE KOROZYONUN OTOMATİK DIŞ
AKIM KAYNAKLI KATODİK KORUMA SİSTEMİ
KULLANILARAK ÖNLENMESİ**

Elk. Yük. Müh. Ramazan YÜKSEL

**F.B.E.Elektrik Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 29 Aralık 1998
Birinci Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selim AY (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hayri YALÇIN (GÜ)
: Prof. Dr. Fahrettin ASLAN (İÜ)

**T.C. YÜK
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL, 1998

SİMGE LİSTESİ	i
KISALTMA LİSTESİ	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON TEORİSİ.....	5
2.1. Elektrot (Metal) Potansiyelleri	9
2.1.1. Elektrot potansiyelinin ölçülmesi	10
2.2. Polarizasyon	11
2.2.1. Polarizasyon eğrileri	15
2.2.2. Polarizasyon çeşitleri.....	18
2.2.3. Limit akım yoğunluğu	18
2.2.4. Hidrojen aşırı gerilimi	19
2.3. Pasiflik.....	20
2.4. Termodinamik Açından Korozyon.....	21
2.4.1. Potansiyel - pH diyagramları.....	22
3. KOROZYON ÇEŞİTLERİ.....	28
3.1. Üniform Korozyon	28
3.2. Galvanik Korozyon	29
3.3. Çatlak Korozyonu.....	30
3.4. Kabuk Altı Korozyonu	31
3.5. Filiform Korozyonu.....	31
3.6. Çukur Korozyonu (Pitting).....	31
3.7. Taneler Arası Korozyon	32
3.7.1. Kaynak çürümesi	32

3.7.2.	Bıçak hattı etkisi	32
3.8.	Seçimli Korozyon	33
3.9.	Erozyonlu Korozyon	33
3.9.1.	Kavitasyon	33
3.10.	Aşınmalı Korozyon	34
3.11.	Yorulmalı Korozyon	34
3.12.	Stres Korozyonu (Gerilmeli Korozyon)	35
3.13.	Hidrojen Kırılganlığı	35
3.14.	Mikrobiyolojik Korozyon	35
3.15.	Yüksek Sıcaklık Korozyonu	36
3.16.	Kaçak Akım Korozyonu	36
4.	KOROZİF ORTAMLAR VE KOROZYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ	37
4.1.	Atmosferik Korozyon	39
4.2.	Tatlı Su İçinde Korozyon	40
4.3.	Kazan Besleme Suları Korozyonu	42
4.4.	Deniz Suyu İçinde Korozyon	42
4.4.1.	Deniz içi korozyonuna etki yapan faktörler	45
4.4.2.	Deniz içindeki yapılarda korozyon hızı	53
4.5.	Zemin İçinde Korozyon	55
4.5.1.	Zemin içinde korozyonun oluşum nedenleri	56
4.5.2.	Zemin korozyonuna etki eden faktörler	59
4.5.3.	Zemin potansiyel ölçümleri	66
4.6.	Korozyondan Korunma Yöntemleri	69
4.6.1.	İnhibitör kullanılması	69
4.6.2.	Anodik koruma yapılması	72
4.6.3.	Katodik koruma yapılması	74
5.	KATODİK KORUMA VE UYGULAMALARI	75
5.1.	Katodik Korumanın Teorik İlkeleri	75
5.2.	Galvanik Anotlu Katodik Koruma	77

5.2.1	Galvanik anotlar	79
5.2.2	Galvanik anot yatakları	84
5.3.	Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sistemleri	86
5.3.1	Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin teorik ilkeleri	86
5.3.2	Transformatör - Redresör üniteleri	90
5.3.3	Dış akım kaynaklı anotlar	91
5.3.4	Dış akım kaynaklı anot yatakları	93
5.3.5	Derin kuyu ve sığ anot yataklarının karşılaştırılması	101
5.4.	Katodik Koruma Sistemlerinin Karşılaştırılması	101
5.5.	Katodik Koruma Kriterleri	102
5.5.1	Katodik koruma kriterlerinin güvenilirliği	105
5.6.	Katodik Koruma Akım İhtiyacı	106
5.6.1	Akım ihtiyacı deneyleri	108
6.	HALIÇ KÖPRÜSÜ ÇALIŞMA SAHASI KOROZIFLİĞİNİN İNCELENMESİ	111
6.1.	Haliç ve Haliç Köprüsünün Tanıtılması	111
6.1.1.	Haliç ve Haliç köprüsünün tarihçesi	113
6.1.2.	Tüm inşaatın proje tanıtımı	115
6.1.3.	Güzergah tanıtımı	115
6.2.	Haliç Ortamının Jeolojik Yapısının İncelenmesi	116
6.2.1.	Topoğrafya	116
6.2.2.	Jeoloji	116
6.2.3.	Arazi çalışmaları	119
6.2.4.	Yeraltı suyu gözlemleri	121
6.2.5.	Laboratuvar deneyleri	121
6.2.6.	Zemin profili	121
6.2.7.	Geoteknik değerlendirme	126
6.2.8.	Çelik boru çakma kazıklı temeller	126
6.3.	Haliç Ortamının Koroziyifliği ile İlgili Ölçme ve Deneyler	126
6.3.1.	1972 yılındaki ölçmeler	127
6.3.2.	1996 yılında yapılan ölçmeler	130
6.3.3.	1997 yılındaki ölçme ve deneyler	131

6.4.	Ortamin Özgöl Direncinin Parametrik Formülasyonu	138
6.5.	Haliç Ortamının Korozyon Derecesinin Değerlendirmesi.....	140
6.5.1.	Deniz suyu ve deniz bataklığı ortamının korozyon değerlendirilmesi	140
6.5.2.	Zemin ortamının korozyon değerlendirilmesi	142
7.	HALİÇ KÖPRÜSÜ KATODİK KORUMA SİSTEMİNİN PROJELENDİRİLMESİ	145
7.1.	Ön Tasarım	145
7.1.1.	İşin tanımı.....	145
7.1.2.	Koruyucu akım miktarı	146
7.1.3.	Ön tasarım proje hesabı	146
7.2.	Korunacak Çelik Kazıkların Tanıtılması.....	147
7.2.1.	Korunacak çelik kazık ölçüleri.....	147
7.2.2.	Korunacak çelik kazık derinlikleri	148
7.2.3.	Korunacak çelik kazıkların yüzey alanları	148
7.2.4.	Korunacak çelik kazıkların kazık başlığı içindeki katod bağlantıları	149
7.3.	Akım İhtiyacı Tespiti.....	150
7.3.1.	Eski katodik koruma sisteminde akım ihtiyacı tespiti.....	151
7.3.2.	Yeni katodik koruma sisteminde akım ihtiyacı tespiti	159
7.4.	Anod Sayısı Tespiti	162
7.4.1.	Tek anod akımı ve kullanılacak anod sayısı.....	162
7.5.	DC Devre Dirençleri	164
7.5.1.	P3 ayak grubunun DC devre dirençleri	164
7.5.2.	P6 ayak grubunun DC devre dirençleri	168
7.5.3.	P4 ayak grubunun DC devre dirençleri	170
7.5.4.	P5 Ayak grubunun DC devre dirençleri	173
7.6.	Trasformatör-Redresör (T/R) Kapasiteleri	173
7.6.1.	P3 ayak grubu T/R kapasitesi	173
7.6.2.	P6 ayak grubu T/R kapasitesi	174
7.6.3.	P4 Ayak grubu T/R kapasiteleri	174
7.6.4.	P5 ayak grubu T/R kapasiteleri	175
7.7.	Anod ve Referans Elektrodların Yerleşim Planı	176
7.8.	T/R Ünitelerinin Yerleşim Planı.....	178

7.9.	T/R Ünitelerinin Enerji Besleme Kabloları.....	180
7.9.1.	Kablo dağıtım planı	180
7.9.2.	Gerilim düşümü ve ısınma kontrolü hesabı.....	182
7.10.	Haliç Köprüsü Katodik Koruma Sisteminin Maliyet Analizi	183
8.	UZAKTAN İZLEME VE KONTROL SİSTEMİ.....	186
8.1.	T/R Üniteleri.....	186
8.1.1.	DC çıkış güç kontrolü.....	188
8.1.2.	T/R ünitesi çalışma prensibi	189
8.1.3.	T/R ünitesinin test edilmesi ve devreye alınması.....	189
8.1.4.	T/R ünitelerinin programlanması	190
8.1.5.	T/R ünitesinin arıza mesajları.....	190
8.1.6.	Ripple incelenmesi	192
8.2.	Öptoelektronik data-line interface.....	192
8.3.	Bilgisayar Sistemi ve Bilgi Alışverişi	193
9.	SİSTEMİN TESTLERİ VE AKIM İNCELEMELERİ	197
9.1.	Derinkuyu Anod Yataklarının Geçiş Dirençlerinin Tespiti	197
9.2.	Deniz Anodlarının Geçiş Dirençlerinin Tespiti.....	199
9.3.	Anod Kablo Testleri	203
9.4.	Katot Kablo Testleri	206
9.5.	Referans Elektrodların Kontrolü	208
9.6.	Akım İncelemeleri ve Yorumlar.....	211
9.6.1.	Ayvansaray-Halıcioğlu eksenindeki ayak akımlarının incelenmesi.....	218
9.6.2.	P3 ve P6 ayak akımlarının incelenmesi.....	221
9.6.3.	Eski katodik koruma sistemi ile yenisi arasındaki akımların incelenmesi	222
9.6.4.	Ayaklar arasındaki interferans akımının incelenmesi	223
9.6.5.	Kazık-zemin potansiyellerinin incelenmesi	224
9.6.6.	Paralel bağlı anotlarla tek anotlar arasındaki direnç incelemesi	224
9.6.7.	Toplam anod akım-gerilimi ile tek tek anod akım-gerilimi arasındaki inceleme	225
10.	SONUÇ VE ÖNERİLER	226

KAYNAKLAR.....	232
ÖZGEÇMİŞ.....	236



SİMGE LİSTESİ

A	Atom ağırlığı
E	Elektrik potansiyeli
F	Faraday sabiti
G	Serbest enerji değişimi
i ve I	Elektrik akımı
K	Denge sabiti
L	Longelier indeksi
m	Kütle
R	Elektrik direnci
S	Anodlar arası mesafe
Q	Elektrik Yüğü
q	İletkenin kesit alanı
t	zaman
U	İyon Mobilitesi
K	İletkenin öz iletkenliğı
Λ	Ahivalent iletkenlik
Λ°	Limit Ahivalent iletkenlik
η	Polarizasyon
α	Disosiasyon derecesi
ρ	İletkenin öz direnci

KISALTMA LİSTESİ

SHE	Standart Hidrojen Elektrot
EMK	Elektromotor kuvveti
ORP	Oksidasyon-Redüksiyon Potansiyeli



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Zemin içinde bulunan bir çelik yapıda oluşan korozyon hücresi	7
Şekil 2.2	Bir korozyon hücresinde akım ve elektronların yönü.....	8
Şekil 2.3	Metal/çözelti potansiyel dengesi.....	9
Şekil 2.4	Bir elektroda dış akım uygulanması halinde anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin oluşması	13
Şekil 2.5	Anodik ve katodik polarizasyon (E-logi) eğrileri	14
Şekil 2.6	Bir korozyon hücresinde karma potansiyelin oluşması	14
Şekil 2.7	Bir elektrot reaksiyonunda akım-potansiyel diyagramı.....	15
Şekil 2.8	Akım yoğunluğu ile aşırı gerilim arasındaki bağıntılar a) Küçük aşırı gerilimler b) Büyük aşırı gerilimler	17
Şekil 2.9	Anot ve katot polarizasyonunun akım yoğunluğu logaritması ile değişimi	17
Şekil 2.10	Pasifleşme özelliği olan bir metalin anodik polarizasyon eğrileri.....	20
Şekil 2.11	Su için potansiyel -pH diyagramı (Shrier, 1977).....	23
Şekil 2.12	Su içindeki çinko için basitleştirilmiş Pourbaix diyagramı (Shreir, 1977).....	25
Şekil 2.13	Demir + su sistemi için Pourbaix diyagramı(Shreir, 1977).....	25
Şekil 3.1	Uniform (Homojen) Korozyon	28
Şekil 3.2	Galvanik korozyon.....	29
Şekil 3.3	Kabuk altı korozyonu oluşumu.....	31
Şekil 3.4	Filiform korozyonu	31
Şekil 3.5	Çukur korozyonu	32
Şekil 3.6	Kaynak yapılan bölgede taneler arası korozyon	32
Şekil 3.7	Dezinsifikasyon korozyonu	33
Şekil 3.8	Erozyonlu korozyon.....	33
Şekil 3.9	Kavitasyon olayının meydana gelişi	34
Şekil 3.10	Yorulmalı korozyon ile oluşan çatlama	34
Şekil 3.11	Stres korozyon çatlama	35
Şekil 3.12	Bir anot yatağı yakınından geçen yabancı boru hattında oluşan kaçak akım korozyonu	36
Şekil 4.1	Demirin korozyonu üzerine pH 'ın etkisi.....	41
Şekil 4.2	Deniz suyunda tuzluluk, sıcaklık, pH ve çözünmüş oksijen konsantrasyonunun derinliğe göre değişimi.	44

Şekil 4.3	Deniz suyu rezistivitesinin içerdği klorür iyonu konsantrasyonuna göre değişimi	47
Şekil 4.4	Deniz suyu rezistivitesi ve iletkenliğinin tuzluluğa ve sıcaklığa göre değişimi. (Öz iletkenlik, mho/cm = 1 / Rezistivite, Ohm.cm)	49
Şekil 4.5	Deniz suyu rezistivitesinin yoğunluk ve sıcaklığa bağlılığı	49
Şekil 4.6	Çözünmüş oksijen konsantrasyonunun derinliğe göre değişimi (o)Pasifik okyanusu (*) Atlantik okyanusu	51
Şekil 4.7	Çözünmüş oksijen konsantrasyonu ile çeliğin korozyon hızı arasındaki bağıntı	51
Şekil 4.8	Deniz içine çakılmış olan bir çelik kazıkta korozyon bölgeleri	54
Şekil 4.9	Çelik yüzeyine yapışan kil topaklarının neden olduğu korozyon.....	56
Şekil 4.10	Farklı zeminlerin neden olduğu korozyon.....	57
Şekil 4.11	Zemin rezistivitesinin rutubet yüzdesine göre değişimi	60
Şekil 4.12	Zemin rezistivitesinin kil, silt ve kum yüzdelerine göre değişimi.....	63
Şekil 4.13	Zemin rezistivitesinin sıcaklığa göre değişimi	64
Şekil 4.14	Wenner dört elektrot yöntemi ile zemin rezistivitesi ölçümü.....	65
Şekil 4.15	Bir çelik yapı (boru hattı) çevresinde oluşan akım ve potansiyel dağılımı	67
Şekil 4.16	Kaplamasız haldeki bir boru ile referans elektrot arasındaki mesafeye bağlı olarak çelik/zemin potansiyelindeki değişim.....	68
Şekil 4.17	Bir korozyon hücresinde polarizasyon eğrileri.....	71
Şekil 4.18	Pasifleşme özelliği olan bir metalde katodik inhibitörün korozyon hızına etkisi.....	71
Şekil 5.1	Galvanik anotlarla katodik koruma	78
Şekil 5.2	Galvanik anotlu bir katodik koruma sisteminin polarizasyon diyagramı	78
Şekil 5.3	Galvanik anotların yeraltına konulması.....	83
Şekil 5.4	Bir boru hattının dış akım kaynağı ile katodik olarak korunması	86
Şekil 5.5	Asitli ortamda çeliğin dış akım kaynağı ile katodik olarak korunması	87
Şekil 5.6	Çeliğin nötral bir ortamda dış akım kaynağı ile katodik korunması	89
Şekil 5.7	Alternatif akımı doğru akıma çeviren (a) yarım dalga , (b) tam dalga	90
Şekil 5.8	Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde	94
Şekil 5.9	İki referans elektrot yardımıyla anot yatağı üzerinde oluşan potansiyel farkının ölçülmesi	99

Şekil 5.10	İnaktif bölge derinliğinin yüzeydeki potansiyel farkına etkisi	99
Şekil 5.11	Bir derin kuyu anot yatağında zemin potansiyelinin	101
Şekil 5.12	Boru/zemin potansiyelinin boru yüzeyi ile referans elektrodun	104
Şekil 5.13	Katodik koruma potansiyel kriterleri	106
Şekil 5.14	Çeşitli cins kaplamalara ait yaklaşık akım ihtiyacı değerleri	108
Şekil 5.15	Çıplak bir boru hattında akım ihtiyacının tayini deneyi	109
Şekil 5.16	Polarizasyon kırılma yöntemi ile katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesi	110
Şekil 6.1	Haliç Köprüsünün genel görünüşü	111
Şekil 6.2	Haliç Köprüsü Projesinin genel görünüşü	112
Şekil 6.3	Bölgesel jeoloji haritası	117
Şekil 6.4	Proje alanın jeoloji haritası	117
Şekil 6.5	Haliç ortamında yapılan sondaj yerleri	119
Şekil 6.6	Sondaj sonuçlarına göre max ve min kazık uzunlukları	121
Şekil 6.7	A köprüsü zemin profili	122
Şekil 6.8	1972'deki pH sonuçları	128
Şekil 6.9	1972'deki sonuçlara göre rezistivite-derinlik grafiği	129
Şekil 6.10	Derinlik-Rezistivite etütlerinin toplu grafiği	132
Şekil 6.11	P3 ayağı derinlik-rezistivite grafiği	133
Şekil 6.12	P3-P4 arası derinlik-rezistivite grafiği	133
Şekil 6.13	P4-P5 arası derinlik-rezistivite grafiği	134
Şekil 6.14	P6 ayağı derinlik-rezistivite grafiği	134
Şekil 6.15	pH değişim grafiği	135
Şekil 6.16	ORP değişim grafiği	135
Şekil 6.17	Toplam çözünmüş katı madde grafiği	136
Şekil 6.18	Sıcaklık değişimi grafiği	137
Şekil 6.19	Tuzluluk grafiği	137
Şekil 6.20	İletkenlik değişim grafiği	138
Şekil 7.1	Haliç Köprüsü ayaklarının yerleşim planı	145
Şekil 7.2	P3 ve P6 (eski) ayak grubunda kazıklar arasındaki katod bağlantıları	149
Şekil 7.3	P4 ve P5 (eski) ayak grubunda kazıklar arasındaki katod bağlantıları	149
Şekil 7.4	P4A, P4B, P5A, P5B (yeni) kazık görünüşleri ve katod bağlantıları	150

Şekil 7.5	P3 ayağının 1972-1989 arası T/R potansiyel değişimi	154
Şekil 7.6	P3 ayağının 1972-1989 arası T/R akım değişimi	154
Şekil 7.7	P4 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R potansiyel değişimi	155
Şekil 7.8	P4 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım değişimi.....	155
Şekil 7.9	P5 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R potansiyel değişimi	156
Şekil 7.10	P5 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım değişimi.....	156
Şekil 7.11	P6 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R potansiyel değişimi	157
Şekil 7.12	P6 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım değişimi.....	157
Şekil 7.13	Polarizasyon kırılma grafiği	161
Şekil 7.14	Deniz anotlarının görünüşü.....	162
Şekil 7.15	P3 DC devre direnci temsil şeması.....	168
Şekil 7.16	P6 DC devre direnci temsil şeması.....	169
Şekil 7.17	P4A ve P4B DC devre direnci temsil şeması	172
Şekil 7.18	P41 ve P42 DC devre direnci temsil şeması.....	173
Şekil 7.19	Anot ve referans elektrodların homojen dağılımı	177
Şekil 7.20	Derinkuyu anodu kesit yerleşim planı	177
Şekil 7.21	Deniz anodu kesit yerleşim planı.....	178
Şekil 7.22	Köprü boyunca kablo dağıtım planı	180
Şekil 7.23	P6 ayak grubundaki kablo dağıtım planı	181
Şekil 7.24	P3 ayak grubundaki kablo dağıtım planı	181
Şekil 7.25	P4 ve P5 ayak grubundaki kablo dağıtım planı	181
Şekil 7.26	Kablo dağıtımı tek hat şeması.....	182
Şekil 7.27	Katodik koruma enerjisi maliyetinin para akış diyagramı halinde gösterilişi	185
Şekil 8.1	Sistem blok diyagramı	186
Şekil 8.2	T/R ünitesi iç dizaynının genel görünüşü	187
Şekil 8.3	T/R ünitesinin elektronik devre detayı	188
Şekil 8.4	Bilgi alışverişi bağlantı şeması	193
Şekil 8.5	Bilgisayarda T/R numarası verilmesi	195
Şekil 8.6	Bilgisayarda T/R seçilmesi	195
Şekil 8.7	Bilgisayarda potansiyellerin okunması.....	196
Şekil 9.1	Derinkuyu anod yatağı geçiş direncinin ölçülmesine ait test düzeneği.....	198
Şekil 9.2	Deniz içindeki anotların test düzeneği.....	199

Şekil 9.3	Anod kablo testi için test düzeneği.....	203
Şekil 9.4	Katot kablo testleri için test düzeneği.....	206
Şekil 9.5	Referans elektrodların kontrolü için test düzeneği	208
Şekil 9.6	T/R üniteleri akımının zamana göre değişimi	211
Şekil 9.7	Kazık zemin potansiyelinin zamana göre değişimi	215



Çizelge 2.1	Standart elektromotor kuvveti serisi (Denny, 1991)	10
Çizelge 2.2	Galvanik seri (Jones, 1992)	11
Çizelge 2.3	Çeşitli referans elektrotların 25 O C deki potansiyelleri (Crow, 1998)....	11
Çizelge 2.4	Değişik metaller üzerinde hidrojen çıkış reaksiyonu denge akım	
	yoğunluğu	19
Çizelge 4.1	Endüstriyel atmosferde 16 yıl bırakılan yumuşak çeliğin korozyon	
	hızının zamanla değişimi	40
Çizelge 4.2	Saf su içinde oksijen çözünürlüğü	40
Çizelge 4.3	Deniz suyunun iletkenliğinin tuzluluk ve sıcaklığa göre	
	değişimi (La Que, 1975).....	47
Çizelge 4.4	Oksijenin çözünürlüğünün sıcaklık ve tuzluluğa göre değişimi.....	50
Çizelge 4.5	Korozyon hızının zamana göre değişimi	55
Çizelge 4.6	Redoks potansiyeli değerlerine göre zeminlerin sınıflandırılması	62
Çizelge 4.7	Zeminlerin rezistivite değerlerine göre sınıflandırılması	65
Çizelge 5.1	Galvanik anotların elektrokimyasal özellikleri.....	79
Çizelge 5.2	Katodik koruma için yaklaşık akım ihtiyacı değerleri.....	107
Çizelge 5.3	Çeşitli cins kaplamalı boru hatlarının kaplama direnci ve akım ihtiyacı	107
Çizelge 6.1	Sondaj çizelgesi	120
Çizelge 6.2	A Köprüsü Sondajları	122
Çizelge 6.3	(B) Köprüsü Sondajları.....	123
Çizelge 6.4	Çelik kazıkların refü boyları.....	126
Çizelge 6.5	Zeminin farklı bölgelerinde pH değerleri.	127
Çizelge 6.6	1972'deki zemin rezistivite deneyi sonuçları	129
Çizelge 6.7	Zeminin korozyonluk gruplaması	129
Çizelge 6.8	Rezistivite-korozyonluk arasındaki irtibat	130
Çizelge 6.9	Şantiyedeki etüt sonuçları (18.01.1996)	130
Çizelge 6.10	Şantiyeden alınan örneklerin laboratuardaki sonuçları(25.01.1996).....	131
Çizelge 6.11	Rezistivite ölçümleri.....	132
Çizelge 6.12	pH ve ORP etütleri	135
Çizelge 6.13	Toplam çözünmüş katı madde etütleri.....	136
Çizelge 6.14	Sıcaklık değişimi	136

Çizelge 6.15	Tuzluluk değişimi etütleri.....	137
Çizelge 6.16	İletkenlik değişimi grafiği	138
Çizelge 7.1	Haliç Köprülerini taşıyan ve korunacak çelik kazık boyutları	147
Çizelge 7.2	Çelik kazıkların zemin içerisindeki derinlikleri	148
Çizelge 7.3	Korunacak çelik kazıkların yüzey alanları	149
Çizelge 7.4	Eski sistemde seçilen akım yoğunluğu.....	151
Çizelge 7.5	Eski köprü çelik kazık ölçüleri	151
Çizelge 7.6	Eski köprünün akım ihtiyacı tespit sonuçları	152
Çizelge 7.7	P3 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım-potansiyel değişimi.....	153
Çizelge 7.8	Eski köprünün projelendirme ve ölçülen akım miktarları	158
Çizelge 7.9	Yeni sistem için seçilen koruyucu akım yoğunlukları.....	159
Çizelge 7.10	Yeni sistem için akım ihtiyacı tespit sonuçları.....	160
Çizelge 7.11	Akım-Potansiyel değerleri (Cu/CuSO4 elektroduna göre).....	161
Çizelge 7.12	Projeler için gerekli anod sayıları.....	164
Çizelge 7.13	P3 ayağında her kazık bölgesi için gerekli akım	167
Çizelge 7.14	P6 ayağında her kazık bölgesi için gerekli akım	169
Çizelge 7.15	P4 ayağında her kazık bölgesi için gerekli akım	171
Çizelge 9.1	Deniz anotlarının geçiş direncine ait ölçme sonuçları (P4 ayak grubu) ..	200
Çizelge 9.2	Deniz anotlarının geçiş direncine ait ölçme sonuçları (P5 ayak grubu) ..	200
Çizelge 9.3	Anod geçiş direnci hesabı.....	201
Çizelge 9.4	Tüm anodların ortalama geçiş dirençleri	201
Çizelge 9.5	Anod kablo test ölçmelerine ait sonuçlar	205
Çizelge 9.6	Katot kablo test sonuçları	207
Çizelge 9.7	Referans elektrod kontrolü sonuçları.....	209
Çizelge 9.8	Referans elektrod kontrol sonuçları.....	210
Çizelge 9.9	Ayaklar arasındaki interferans akım incelemesi.....	223

TEŞEKKÜR

Tavsiyesi ve yönlendirmesi ile doktora sınavına girmeme ve sınavı geçmeme vesile olan, doktoramın devamı süresince oluşan her türlü idare problemin çözülmesi yönünde yardımlarını esirgemeyen, hatta doktora yapmamın çok zor olduğunu hissettiğim zamanlarda doktoramı tamamlamak gerektiğini anlatarak ve önümü açarak manevi desteğini sonuna kadar kullanan, doktora çalışmamın tamamlanmasında büyük katkı sahibi Yıldız Teknik Üniversitesi Elk. Müh. Bölüm Başkanı hocam Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR'a, doktora çalışmamın devamı esnasında her konuda yardımlarını eksik etmeyen YTÜ Elk. Mühendisliği bölümü hocalarıma ve araştırma görevlisi kadrosuna, lisans öğrenimim sırasında derslerine girdiğim, lisansüstü ve doktora çalışmalarında yanında çalışma şerefine erdiğim, çalışmalarımda tıkanıp her noktada yönlendirmesi ile önümü açan, doktoramı idari mevzuat ve süre açısından bitiremeyeceğimi düşündüğüm anlarda devreye girerek çalışmalarımı hızlandıran, bu uğurda değerli zamanını harcayan, aynı zamanda tez yöneticisi olarak tezimi bitirmemi sağlayan hocam Sn. Prof. Dr. Selim AY'a mühendislik dalı olarak farklı bir bölümde hocalık yapması sebebiyle lisans ve lisansüstü öğrenimimde tanıma şerefine eremediğim fakat doktora çalışmamı katodik koruma konusunda yapmama vesile olan ve değerli zamanlarını vererek tez yöneticisi olarak tezimi bitirmemi sağlayan hocam Sn. Prof. Dr. Zeki ÇİZMECİOĞLU'na, Haliç Köprüsünün yapım projesi vasıtasıyla tanıdığım ve tanımakla şerefleendiğim, katodik koruma konusunu sevmeme ve doktora tezi olarak hazırlamama vesile olan, tezimin istisnasız her aşamasında teorik ve pratik olarak beni yönlendiren ve burada sıralamakla anlatamayacağım daha nice katkıları olan Gazi Üniversitesi öğretim elemanlarından hocam Sn. Doç. Dr. Timur KOÇ'a, tez çalışmamı okumak, incelemek ve düzeltmek suretiyle değerli fikir ve zamanlarını benim için harcayan, jüri üyesi olarak kış şartlarında Ankara'dan İstanbul'a gelerek jüri savunmama katılan geç tanımakla üzüntülü olduğum fakat tanımakla şeref bulduğum hocam Sn. Prof. Dr. Hayri YALÇIN'a, lisans öğrenimim sırasında derslerine girdiğim, jüri üyesi olarak tez çalışmamı okumak, incelemek ve düzeltmek suretiyle değerli fikir ve zamanlarını benim için harcayan ve hayatımın her devresinde örnek aldığım hocam Sn. Prof. Dr. Fahrettin ASLAN'a, projenin uygulandığı Haliç Köprüsünün idari yapım sorumlusu Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü yetkililerine, özellikle Haliç Köprüsünde kontrol mühendisliği yapmama vesile olan ve bilgi sahibi olduğumu düşünerek katodik koruma işinin içinde olmama vesile olan Köprü Başmühendisi Sn. Mehmet ERİNÇER'e, bu tezin uygulamasının yapıldığı Haliç Köprüsündeki çalışma şartları ve zamanları konusunda toleransını hiç eksiltmeyerek önümü açan ve 1994-1999 arası uygulamanın başından sonuna kadar yanında kontrol mühendisi olarak çalıştığım Haliç Köprüsünün yapım sorumlusu ve Kontrol Şefi Sn. Ahmet AKDENİZ'e, yine her türlü yönlendirmesi ile önümü açan teknik seyahat sebebiyle gittiği Japonya'da dahi katodik koruma konusunda benim için teknik doküman toplayan ve Türkiye'ye getiren Haliç Köprüsünde beraber çalıştığım Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü Köprü Başmühendisi Sn. Erol ALTUN'a, yine çalışmamın son zamanlarında toleransını eksik etmeyen Fatih Sultan Mehmet Köprüsü Başmühendisi Sn. Tamer KUNTER'e, Haliç Köprüsü çelik kazıklarının katodik koruma uygulamasında beraber çalıştığımız 3K Ltd. Şti.ne ve sahibi Sn. Erol DAĞ'a, çalışmalarımda hiçbir yardımını esirgemeyen IHI-ENKA-Bayındır Konsorsiyumu yetkililerine ve Haliç Köprüsü Kontrollük çalışanlarına böyle bir uygulamanın bitirilmesine vesile oldukları ve bitmesini sağladıkları için burada ifade edilen sözlerin ve şükran ifadelerinin yetmeyeceğinin bilincinde olarak ayrı ayrı TEŞEKKÜR etmeyi bir borç bilirim.

ÖZET

Bu çalışmada, Haliç Köprüsünün çelik kazıklarının elektrokimyasal korozyonu etüd edilerek, korozyonun önlenmesi amacıyla, korozyona karşı metallerin korunması için en etkin ve ekonomik yöntem olan dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin bilgisayar kontrollü olarak çelik kazıklara uygulanması incelenmiştir. Bilgisayarlı kontrol ve izleme özelliği olan katodik koruma sistemi ülkemizde Haliç Köprüsünün çelik kazıklarında ilk defa bu çalışma ile uygulanmıştır. Bilgisayar kontrollü katodik koruma sistemi için scada uyumlu trafo-redresör (T/R) ünitelerinin imalatı, optoelektronik line interface ünitesinin dizaynı, sisteme uygun bilgisayar programı yazılımı ve T/R üniteleri ile bilgisayar ünitesinin telekomünikasyon kabloları üzerinden haberleştirilmesi ana başlıklar halinde toplanabilecek ülkemizdeki ilk olma özelliklerindendir. Bu çalışmanın ilk bölümlerinde katodik korumanın dayandırıldığı temel teorik bilgiler ve satandartlara değinilerek korozyonun elektrokimyasal teorisi incelenmiş ve korozyon çeşitleri açıklanmıştır. Ayrıca korozyonun en büyük sebebi olan deniz suyu ve zemin gibi ortamlar incelenerek çelik yapıların korozyonunu önleme yöntemleri ve özellikle katodik koruma geniş bir şekilde anlatılmıştır. Son bölümlerde ise katodik korumanın teorik ilkeleri çerçevesinde gerçekleştirilen jeolojik sondajlar, ölçme ve deneyler yardımıyla Haliç bölgesinin koroziyifliğı ortaya çıkartılarak katodik koruma sistemi projelendirilmiştir. Haliç Köprüsünün çelik kazıklarının korozyona karşı korunması daha önce deniz içindeki ayaklarda dört noktada bulunan T/R üniteleri çıkış potansiyelinin manual olarak ayar edilmesine dayanmakta idi. Bu yeni projelendirme ile T/R ünitesi sayısı 10'a çıkarılarak daha uniform bir akım dağılımı sağlanmıştır. Bu uygulamada ortaya konan telekomünikasyon kablosu üzerinden bilgi alışverişi ve bilgisayarla kontrol sayesinde klasik katodik koruma sistemlerinde uzun zaman dilimleri halinde elde edilebilen sistem potansiyeli, sistem akımı, zemin potansiyeli gibi bilgilerin her yarım saatte bir elde edilmesi sağlanmaktadır. Sürekli izlenebilen bu bilgiler aynı zamanda bilgisayar ortamında kaydedilmekte ve saklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Katodik koruma, Bilgisayar kontrolü, Korozyon, Uzaktan kumanda, Uzaktan izleme

ABSTRACT

In this study, electrochemical corrosion of Golden Horn Bridge steel piles were investigated. To prevent corrosion, computer controlled impressed current cathodic protection system is used. This system is the most effective and economic solution to prevent corrosion. Computer controlled and remote monitoring cathodic protection system was applied first time in Our Country at Golden Horn Bridge steel piles. Especially the following main items produced in connection with this system which were also firstly maintained in our country can be summerized as follows: Production of scada compatible transformer-rectifier (T/R) units for computer controlled cathodic protection system, design of optoelectronic line interface unit, preparation of a computer software program suitable for this system, communication of T/R unit and computer unit through telecommunication cables. In the first section of this study, electrochemical theory is reviewed and types of corrosion have been explained based on main theoretical information. Furthermore, salty water and soil, which are the main causes of corrosion, have been surveyed, corrosion prevention methods of steel structures and especially cathodic protection has been explained in an extensive way. In the final sections, cathodic protection system was designed by using geological research data obtained from boring results, measurements and tests made under theoretical principals of cathodic protection. At the past cathodic protection of Golden Horn Bridge steel piles were made by manual adjustment of the T/R unit exit potential which were located at four points on the piers in the sea. By this new project, number of T/R units were increased to ten in order to maintain a more uniform current distribution. At the old system the information such as system currency, system voltage, soil potential can be obtained within longer time intervals whereas in the new cathodic protection system same information can be obtained and provided at every half hour intervals by means of computerized remote control and monitoring. Continuously monitored data is recorded and stored in the computer.

Keywords: Cathodic Protection, Computer control, Corrosion, Remote control, Remote monitoring

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi endüstride kullanılan metallerin %90'dan fazlası demir ve çelikten oluşmaktadır. Üretilmekte olan demirin çok az bir kısmı paslanmaz çelik veya kaliteli alaşımlar halinde iken, geri kalan kısmı yumuşak çelik yada dökme demir halinde kullanılmaktadır. Demir ve çeliğin büyük bir kısmı her yıl korozyon sonucu kaybedilmekte veya kullanılamaz hale gelmektedir. Korozyon, genel anlamda malzemenin çevre etkisi ile bozulması demektir. Başka bir deyişle, metallerin çevresi ile reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesi olarak da tanımlanabilir.

Korozyon etkisiyle köprüler, korkuluklar, direkler, iskeleler, depolar, su ve yeraltına konulmuş olan boru hatları, depolar, gemiler, dubalar, baraj kapakları, kazanlar, borular, ızgaralar, elektrik makineleri vb alet ve ekipman her yıl zarar görmekte ve ekonomik ömürlerinde azalmalar oluşmaktadır. (Yalçın ve Koç, 1995). Tüm korozyon kayıplarının ölçülerek bulunması, ya da kesin tahmini çok güç olmakla birlikte, önemli bir ulusal kayıp olduğu gerçektir. Korozyon sebebiyle malzeme, enerji, emek ve bilgi kaybının yıllık değeri ülkemiz için Gayri Safi Milli Gelir'in %4-5'i civarında olduğu değerlendirilmektedir. (Çizmecioğlu, 1995)

Bu çalışmada, İstanbul Haliç Köprüsü'nün çelik kazıklarının dış akım kaynaklı katodik koruma tekniği ile bilgisayar kontrollü olarak korozyona karşı korunması incelenmiştir. Haliç Köprüsü'nün korozyona karşı korunması, ilk projendirme çerçevesinde, köprü ortasındaki dört noktada bulunan T/R üniteleri ile sağlanmaktaydı. Manuel olarak yapılan bu işlem, T/R ünitelerinin gerilimlerinin yılların deneyimleri çerçevesinde belirli zamanlarda ayar edilmesine dayanmaktaydı. 1972 yılından itibaren aralıklarla yapılan ölçüm sonuçları ayarlar için bir ön bilgi kaynağı oluşturmaktaydı. Haliç Köprüsü'nün katodik korumasının yenilenmesini öngören ikinci projelendirmenin ise birinciye göre şu farklılıkları bulunmaktadır:

- T/R ünitesi sayısı 10'a çıkarılmış olup daha üniform akım dağılımı hedeflenmiştir.
- Katodik korumanın bilgisayarla uzaktan izleme ve kontrol edilebilirlik özellikleri mevcuttur.

- Projelendirme, ilk projelendirmeden itibaren geçen yılların verilerini de göz önüne aldığından, mevsimlik farklılıklar, akım ihtiyaçları, zeminin gerek kara parçası gerekse su (çamur) bölümündeki rezistivitesi vb. için önemli ölçüde duyarlı analiz gerçekleştirilmiş bulunmaktadır.

Bilgisayar kontrollü katodik koruma ile sağlanan katkılar şöyle ifade edilebilir:

- Optimum işletme hedeflendiği için şebekeden alınan toplam elektrik enerjisi minimumdur.
- Katodik koruma sisteminin izlenebilir ve uzaktan kontrol edilebilir olmasıyla kesintisiz ve güvenilir bir korozyon koruyuculuğundan şüphe olmaması sağlanmaktadır.
- Köprüde insan unsurundan kaynaklanan işletme ve onarım riskinin en aza indirgenmesi ek onarım malzeme/işçilik maliyetini minimuma indirilmektedir.
- Köprünün çelik kazıklarının ekonomik ömrü teorik olarak sonsuz hale getirilmiş olmaktadır.

Korozyona karşı metallerin korunması için en etkin ve ekonomik yöntem olan ve Haliç köprüsünde 1997 yılında başlanan 1998 Temmuz ayında ise tamamlanarak fiilen devreye sokulan katodik koruma sistemi bilgisayar kontrollü olarak projelendirilmiştir. Bilgisayar kontrolü açısından ülkemizde ilk defa gerçekleştirilen “Haliç Köprüsünün çelik kazıklarının bilgisayar kontrollü katodik koruma sistemi” iki yıllık bir imalat ve tesis sürecinde projenin başlangıcından bitimine kadar yerinde incelenmiş, veri akışı ve çıktılar değerlendirilmiş, tüm inceleme-analiz-yorum sonuçları bu çalışmaya yansıtılmıştır.

Haliç Köprüsü’nde korozyona karşı yapılan katodik koruma, kara parçasındaki ayakları ve su (çamur) içindeki ayakları kapsamaktadır. Dolayısıyla Haliç suyunun mevsimlere göre değişen akıntı hızı, sıcaklık, tuzluluk, çevre atıkları vb. faktörlerce etkilenen özel karakteristiği bilinen deniz suyundan geniş ölçüde farklılık göstermektedir. Yıl boyunca anlık değiştiği kabul edilebilecek Haliç suyunun, katodik koruma sırasında gösterileceği akım ihtiyacı da değişkendir. Köprünün uzaktan kontrollü olarak, bir merkezden tüm katodik koruma verilerinin değerlendirilmesine yönelik proje, 1972 yılındaki ilk projelendirme verilerinin ve ölçüm sonuçlarının yanısıra köprü civarındaki yeni ölçme ve

değerlendirme bulgularına da ihtiyaç göstermiştir. Bölgenin jeolojik, topografik, kimyasal ve elektrokimyasal etütleri topluca göz önünde bulundurulmuştur. Bir başka ifadeyle;

- Haliç Köprüsü'nün katodik korumasına esas olacak tüm etüt ve ölçmeler
- Haliç Köprüsü'ndeki ilk katodik koruma projesinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi.
- Bilgisayar kontrollü katodik koruma sisteminin teknik şartname hazırlığından başlayarak malzeme seçimi ve montajda aralıksız denetimin sağlanması
- Giriş ve çıkış bilgilerinin değerlendirilmesi gibi faaliyetler, görev yerinin (Karayolları Genel Müdürlüğü 17. Bölge Müdürlüğü kapsamında) Haliç Köprüsü olması dolayısıyla fiilen gerçekleştirilmiş bulunmaktadır.

Bu çalışmada, korozyon ve elektrokimya ile ilgili genel tanımı ve bağıntıların verilmesinin ardından, Türkiye'de ilk kez uygulanan Haliç Köprüsü ayaklarının çelik kazıklarının bilgisayar kontrollü katodik koruma sistemi; etüt, projelendirme, tasarım ve işletme aşamalarıyla ayrıntılı olarak incelenmiştir. Haliç köprüsünde eskiden uygulamada olan katodik koruma projesi ile yeni proje karşılaştırılmış, yeni proje değerleri işletmede elde edilenlerle karşılaştırılmış, sapma değerleri yorumlanmıştır.

Projelendirme için önce pH, rezistivite, oksijen konsantrasyonu vb. incelemeleri yapılmış olup sonuçlar eski köprüdeki incelemelerle ve literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak Haliç bölgesinin (deniz suyu ve çamurunun) korozifliği ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra akım ihtiyacı çeşitli yöntemlerle belirlenerek katodik koruma sisteminin anot ve referans elektrot sayısı, T/R ünitesi kapasiteleri belirlenerek ön tasarım ve nihai projelendirme gerçekleştirilmiştir. Uzaktan izleme ve kontrol sistemi için ülkemizde ilk defa imal edilip bir arada monte edilen scada uyumlu T/R üniteleri, optoelektronik line interface ünitesi ve içinde katodik koruma sistemine uygun software yazılımı mevcut bulunan bilgisayar sistemi kurularak sistemin testleri ve akım incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Haliç Köprüsünde eskiden uygulamada olan katodik koruma sistemi ile yeni proje karşılaştırılmış, yeni proje değerleri işletme esnasında elde edilenlerle beraber değerlendirilmiş ve sapma değerleri yorumlanmıştır.

Çalışma, Türkiye’de ilk kez uygulanan bu tip bir korozyona karşı koruma sisteminde, gelecekteki benzer tasarımlar için de göz önüne alınması gereken tüm parametreleri, “proje-teori-deneyim” eksenin de ilk kez birleştirilmiş olma niteliğindedir.



2. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON TEORİSİ

Korozyon metallerin çevresi ile yaptığı kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu metalik özelliklerini kaybetmesi olayıdır. Metaller tabiatta genellikle oksit ve sülfür bileşikleri halinde bulunur. Bu bileşikler termodinamik olarak metalin en stabil halidir. Çünkü metal bu bileşik halinde iken serbest enerjisi en düşük durumdadır. Tabiatta stabil halde bulunan mineraller enerji harcanarak metal haline dönüştürülür. Ancak metaller üretilirken almış oldukları enerjiyi geri vererek kendiliğinden tabiatta bulundukları hale dönmek eğilimindedir. Örneğin demir tabiatta genellikle oksit mineralleri halinde bulunur. Bu minerallerden yüksek fırınlarda enerji harcanarak üretilen demir metali zamanla korozyona uğrayarak tabiatta bulunan demir oksit mineraline benzeyen pası oluşturur.

Yüksek sıcaklıkta yürüyen oksitlenme reaksiyonları dışındaki bütün korozyon olayları elektrokimyasal reaksiyonlar ile gerçekleşir. Bu reaksiyonlar metal elektrolit ara yüzeyinde meydana gelir ve elektron alış-verişi ile yürürler. Elektronlar metal atomları üzerinden hareket ederek elektrik akımını taşır. Elektronlar metal üzerindeki yüksek negatif yüklü bölgelerden düşük negatif yüklü bölgelere doğru tek yönlü hareket ederler. Bu iletme biçimine **Elektronik İletkenlik** (Ünari, 1978) denir. İyon içeren çözeltiler de elektrik akımını iletir. Elektrolitler içinde iyonlar serbest halde hareket halindedir. Elektrik akımı iyonlar tarafından taşınır. **İyonik iletken** olan bütün çözeltiler, doğal sular, zeminler ve beton bir elektrolit olarak korozyona neden olabilir. Rutubetli hava içinde bulunan su buharı da metal yüzeyinde yoğunlaşarak korozyon için uygun bir ortam oluşturur. Bu nedenle atmosfer içinde yürüyen korozyon olayları da elektrokimyasal reaksiyonlar ile gerçekleşir.

Çeşitli metallerin aynı bir ortam içindeki korozyon hızları birbirinden farklıdır. Bir metal ne derece aktif ise, yani iyon haline geçme isteği ne derece yüksek ise o metalin korozyona uğraması da o derece kolay olur. Standart EMK serisi metallerin aktiflik dereceleri hakkında fikir verebilir. Bu seride daha yukarda bulunan metallerin aşağıda bulunanlara göre daha kolay korozyona uğrayacağı söylenebilir. Ancak pasifleşme olayı nedeniyle bu kuraldan sapmalar olabilir.

Korozyon olayı, biri anotta oksidasyon, diğeri katotta redüksiyon şeklinde aynı anda yürüten iki elektrokimyasal reaksiyondan oluşur. Bu açıdan bakıldığında korozyon olayı kendiliğinden akım üreten bir galvanik pil olarak kabul edilebilir. Korozyonun yürümesi için mutlaka iki ayrı metalin bulunması şart değildir. Korozyon bir metal yalnız başına elektrolit içinde bulunurken de meydana gelebilir. Metal yapısında veya elektrolitte bulunan bazı farklılıklar nedeniyle bir potansiyel farkı oluşur ve bunun sonucu olarak, metal yüzeyinin bazı bölgeleri katot ,bazı bölgeleri de anot olur. Böylece mikro veya makro ölçüde bir korozyon hücresi oluşur. Anot- katot arasındaki elektron akımı metal üzerinden gerçekleşir. Korozyon olayı metalin oksidasyonu ile anot bölgesinde meydana gelir. Metal iyon halinde çözeltiye geçer.



Korozyon olayında katotda metalin redüksiyonu yerine, içinde bulunduğu ortam koşullarına bağlı olarak başka çeşit redüksiyon reaksiyonları meydana gelir. .Katot reaksiyonu elektrolit ortamının pH ' ına ve çözünmüş oksijenin konsantrasyonuna bağlıdır.Doğal elektrolitler içinde yürüten korozyon olaylarında başlıca aşağıdaki iki katot reaksiyonu söz konusu olur.

a) Asidik ortamlarda katot reaksiyonu hidrojen iyonu redüksiyonu ile gerçekleşir.

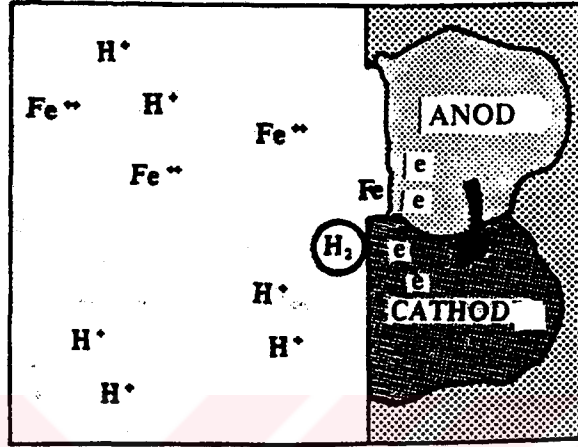


b) Nötral ve çözünmüş oksijenin bulunduğu ortamlarda katot reaksiyonu su içinde çözünmüş olan oksijenin elektron alarak hidroksil iyonu haline dönüşmesi şeklinde yürür.



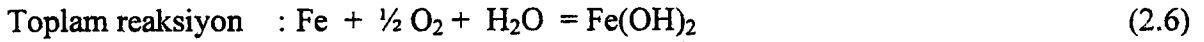
Doğal sular içinde pH genellikle 7' den daha yüksektir. Bu nedenle doğal sular içindeki korozyon olayı (b) de olduğu gibi katotta oksijen redüksiyonu ile birlikte yürür. Bu nedenle korozyon olayının yürüyebilmesi için elektrolit içinde mutlaka çözünmüş oksijen bulunması gerekir

Metal yüzeyinin her bölgesi aynı derecede oksijen alamayabilir. Daha fazla oksijen alabilen bölgeler katot, az oksijen alan bölgeler de anot olur. Böylece konsantrasyon piline benzer şekilde bir korozyon hücresi oluşur. Bu korozyon hücresinin anot olan bölgelerinde metal iyon haline geçerek korozyona uğrar. Daha fazla oksijen alabilen bölgeler katot olacağından korozyona uğramaz (Şekil 2.1) (Jones, 1992).



Şekil 2.1 Zemin içinde bulunan bir çelik yapıda oluşan korozyon hücresi

Yukarda açıklandığı üzere korozyon olayları korozyon hücrelerinin anot ve katodunda oksitlenme ve redüklenme reaksiyonları ile yürür. Örneğin demirin korozyonu sonucu pas oluşur.

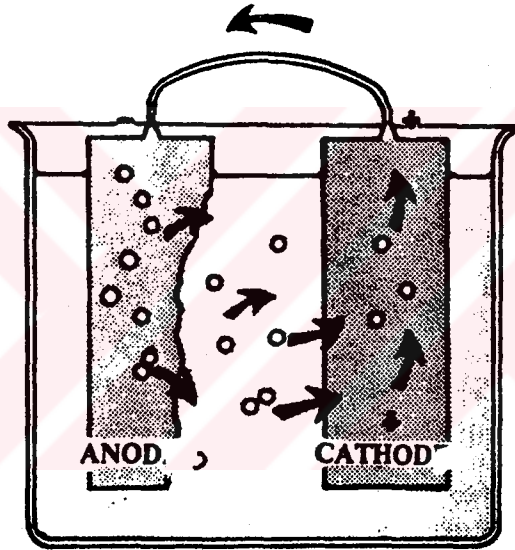


Bu reaksiyonlardan görüldüğü üzere nötral bir ortamda korozyon olayının yürümesi için oksijene ve suya ihtiyaç vardır. Diğer taraftan anot ve katot reaksiyonlarının yürümesi için bir potansiyel farkının bulunması gerekir. Anotta açığa çıkan elektronlar hiç bir zaman serbest halde bulunamazlar. Elektronların açığa çıktığı anda kullanılması gerekir. Anot bölgesinde oksidasyon reaksiyonu sonucu açığa çıkan elektronlar korozyona uğrayan metal üzerinden akarak katot bölgesine gider ve orada aynı anda yürümekte olan redüksiyon reaksiyonunda kullanılır. Bu iki reaksiyon birlikte ve kendiliğinden yürür.

Bir metal ve çözeltisinden oluşan sisteme **yarı hücre** denir. Çözeltiye ikinci bir elektrot daldırılarak bunlar birbirine bağlanırsa buna da bir **elektrokimyasal hücre** denir. Yukarıda açıklanmış olduğu üzere, bir korozyon hücresi, aynı elektrolit içine daldırılmış biri anot diğeri katot iki elektrottan oluşan bir pil gibi düşünülebilir (Şekil 2.2) (Jones, 1992). Elektrokimyasal hücreler kendiliğinden akım üretilip üretmediklerine göre iki gruba ayrılır.

Elektrokimyasal Piller: Bunlar kendiliğinden akım üreterek kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen hücrelerdir. Örneğin kuru pil olarak bilinen çinko-karbon pili böyle bir elektrokimyasal hücredir.

Elektroliz Hücreleri: Dıştan uygulanan elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürürler.



Şekil 2.2 Bir korozyon hücresinde akım ve elektronların yönü

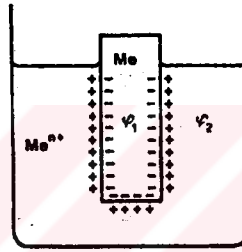
Pilden akım geçebilmesi için elektrodların dış devreden bir metalik iletken ile birbirine bağlanması gerekir. Korozyon olayında dış devre bağlantısı metal üzerinden gerçekleşir. Elektrolit genellikle iyon içeren bir sulu çözeltidir. Elektrik akımı elektrolit içinden iyonlar tarafından taşınır. Elektrolit içinde akım anottan katoda doğru akar. Dış devrede elektrik akımı yönü, elektron akış yönünün tersine olarak katotdan anoda doğrudur.

2.1. Elektrot (Metal) Potansiyelleri

Yüksek sıcaklıkta oluşan oksidasyon olayları da dahil,bütün metalik korozyon olaylarının gerçekte elektrokimyasal temellere dayandığı kesin olarak bilinmektedir. Bir metal çubuk kendi iyonlarını içeren bir çözelti içine daldırılırsa, metal iyonları çözeltiye geçer. Çözelti (+), metal (-) yükle yüklenir. Ara yerde bir potansiyel farkı doğar. Elektron vererek çözeltiye geçen metal iyonları ile, elektron alarak yeniden serbest metal haline geçen metal atomları,



dengeğini oluşturur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Metal/çözelti potansiyel dengesi

Bu koşullar altında her metal kendine özgü bir potansiyel gösterir. Denge halinde metal ile çözelti arasında oluşan potansiyel farkına **elektrot potansiyeli** her metalin kendi iyonlarının 1 molar (daha doğrusu aktivitesi 1 olan) çözeltisi içine daldırıldığında 25 °C sıcaklıkta ölçülen potansiyele o metalin **standard elektrot potansiyeli** denir. Denge halinde bulunan bir elektrodun potansiyeli sabit kalır. Ancak metal üzerinde toplanan elektronlar herhangi bir şekilde uzaklaştırılacak olursa denge bozulur. Metal çözünmeye devam eder. Bunun aksine olarak metale dışardan elektron akımı söz konusu olursa, bu defa çözeltide bulunan metal iyonları metal haline indirgenerek bu elektronlar kullanılır(Yalçın ve Koç, 1998).

- Elektrod potansiyelini doğrudan ölçebilmek mümkün olmaz. Potansiyel ancak bir fark olarak ölçülebilir. Metal elektrod ile standart hidrojen elektrod arasındaki potansiyel farkı

kolaylıkla ölçülebilir. Referans elektrod olarak seçilmiş olan standart hidrojen elektrodun potansiyeli sıfır kabul edilir. Bu durumda her iki elektrod arasında ölçülmüş olan potansiyel farkı hidrojen skalasına göre metal elektrodun potansiyelini verir. Bu potansiyel değerleri liste halinde yazılarak standart elektromotor kuvveti cetveli (EMK) elde edilir. (Çizelge 2.1) Pratikte metallerin deniz suyu içinde ölçülen potansiyel değerleri de önemli bir gösterge olarak kullanılır. Çizelge 2.2’de çeşitli metal ve alaşımların deniz suyu içinde ölçülen potansiyel değerleri verilmektedir. Bu liste **galvanik seri** olarak bilinir. (Danny, 1991)

Çizelge 2.1 Standart elektromotor kuvveti serisi (Denny, 1991)

Elektrot reaksiyonu (*)	Standard elektrot potansiyeli 25 C°, (Volt)
$K^+ + e^- \rightleftharpoons K^0$	- 2.92
$Ca^{2+} + 2 e^- \rightleftharpoons Ca^0$	- 2.87
$Na = Na^+ + e^-$	- 2.71
$Mg = Mg^{2+} + 2 e^-$	- 2.34
$Al = Al^{3+} + 3 e^-$	- 1.67
$Mn = Mn^{2+} + 2 e^-$	- 1.05
$Zn = Zn^{2+} + 2 e^-$	- 0.76
$Cr = Cr^{3+} + 3 e^-$	- 0.71
$Fe = Fe^{2+} + 2 e^-$	- 0.44
$Cd = Cd^{2+} + 2 e^-$	- 0.40
$In = In^{3+} + 3 e^-$	- 0.34
$Co = Co^{2+} + 2 e^-$	- 0.28
$Ni = Ni^{2+} + 2 e^-$	- 0.25
$Sn = Sn^{2+} + 2 e^-$	- 0.14
$Pb = Pb^{2+} + 2 e^-$	- 0.13
$H_2 = 2 H^+ + 2 e^-$	0.00
$Cu = Cu^{2+} + 2 e^-$	+ 0.345
$Hg = Hg^{2+} + 2 e^-$	+ 0.799
$Ag = Ag^+ + e^-$	+ 0.800
$Au = Au^+ + e^-$	+ 1.680

2.1.1. Elektrot potansiyelinin ölçülmesi

Elektrot potansiyellerini deneysel olarak doğrudan ölçmek mümkün olmaz. Bu ancak bir yardımcı elektrot kullanılarak ve bu iki elektrot arasındaki potansiyel farkının ölçülmesi yoluyla belirlenebilir. Referans elektrot olarak potansiyeli zamanla değişmeyen yarı hücreler (özel elektrodlar) kullanılır. Referans elektrot potansiyeli sabit bir değerdir ve bilinir. Standart hidrojen elektrodun potansiyeli sıfır kabul edilir. Diğer referans elektrotların potansiyeli standart hidrojen elektroda göre ayarlanır. Pratikte kullanılmakta

olan referans elektrotlar ve hidrojen skalasına göre potansiyel değerleri Çizelge 2.3’de verilmektedir .

Çizelge 2.2 Galvanik seri (Jones, 1992)

Metal veya Alaşım	Elektrot potansiyeli (mV)
Mağnezium (HP)	- 1750
Mağnezium (AZ63)	- 1550
Çinko	- 1100
Aliminyum (AL Clad)	- 1010
Dökme demir	- 680
Yumuşak çelik	- 680
Paslanmaz çelik (430, aktif)	- 640
Paslanmaz çelik (304, aktif)	- 600
Paslanmaz çelik (410, aktif)	- 590
Pirinç	- 430
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	- 150
Monel	- 150
Paslanmaz çelik (316, pasif)	- 120

Çizelge 2.3 Çeşitli referans elektrotların 25 ° C deki potansiyelleri (Crow, 1998)

Referans elektrot	Gösterilişi	E _H (Volt)
Standart Hidrojen Elektrot	Pt, H ₂ (P=1atm) / H ⁺ _{a=1}	0
Doygun Kalomel Elektrot	Hg/Hg ₂ Cl ₂ , KCl(doygun)	+0,244
Gümüş/Gümüş Klorür Elektrot	Ag/AgCl, KCl (0,1m)	+0,288
Doygun Bakır/Bakır Sülfat elektrot	Cu/CuSO ₄ (doygun)	+0,316

2.2. Polarizasyon

Eğer bir metal kendi iyonlarını içeren bir çözelti içine daldırılırsa, metalin oksidasyon reaksiyonu ile ters yöndeki, metal iyonlarının redüksiyon reaksiyonu bir denge haline gelir. Denge halinde her iki yöne doğru olan elektron değişimi hızı birbirine eşittir. Bu reaksiyonlardan oluşan elektrik akımı çözelti içinde iyonlarla ve metal içindende

elektronlarla taşınır. Bu reaksiyon hızlarının birbirine eşit olduğu anda, her iki yönde akan akım birbirine eşit olup bu akım denge akımı olarak adlandırılır. Bu andaki potansiyel de denge potansiyelidir. Denge halindeki akım, I_0

$$I_0 = I_a = I_c \quad (2.8)$$

anodik (i_a) ve katodik (i_c) akımlarının birbirine eşit olduğu andır. Eğer denge potansiyelinde katot yönünde bir sapma meydana gelirse devreden geçen net akım, i ,

$$i = i_c - i_a \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir. Bunun aksine olarak denge potansiyeli anot yönünde kayacak olursa,

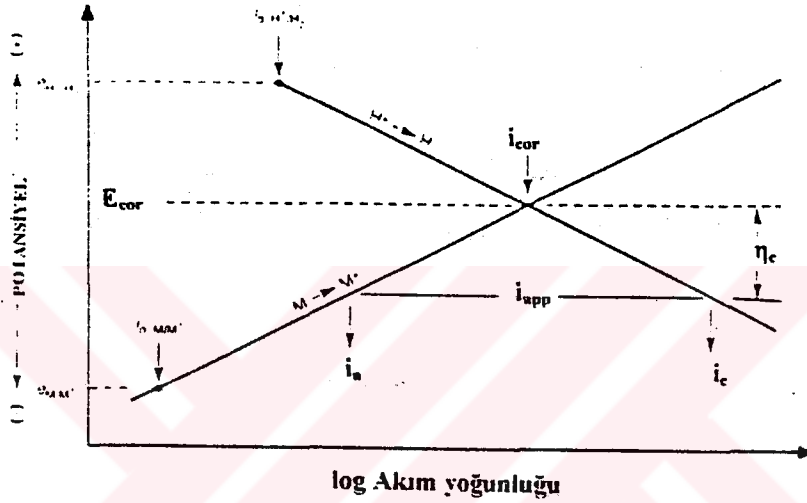
(i) net akımı geçer. Bu akımı doğrudan ölçebilmek mümkündür. (Bockris ve Reddy, 1970)

Bu durumda oksidasyon ve redüksiyon akım yoğunlukları da (2.8) eşitliğinde gösterildiği gibi birbirine eşittir. (2.8) eşitliğindeki (i_0) akım yoğunluğuna **denge akım yoğunluğu**, denge halinde ölçülen E_0 potansiyeline de **denge potansiyeli** denir. Denge potansiyeli bir reaksiyonun nereye doğru gittiğini belirten iyi bir gösterge olmasına rağmen, reaksiyonun ne derece hızlı yürütebileceği ve oluşan korozyon hızı konusunda bir fikir vermez. Korozyon hızını ölçmek için elektroda mutlaka bir akım uygulanması ve bu akım ile birlikte elektrot potansiyelindeki değişimin ölçülmesi gerekir. Akım geçerken elektrot potansiyelinde meydana gelen değişime **polarizasyon** denir (Yalçın ve Koç, 1998).

Korozyona uğrayan bir elektrotta metalin anodik reaksiyonu ile katot reaksiyonu, örneğin hidrojen iyonu redüksiyon reaksiyonu bir dengeye ulaşır. Böylece bir elektrot yüzeyinde biri anodik diğeri katodik iki farklı reaksiyonun dengesi ile oluşan bir **karma potansiyel**, yani **korozyon potansiyeli** oluşur. Böyle korozyona uğrayan bir elektroda anodik veya katodik yönde bir (i_{app}) dış akımı uygulanacak olursa bu durumda $i_a = i_c$ eşitliği bozulur. Devreden geçen net akım bu ikisi arasındaki farka eşit olur. Bu durumda elektrot potansiyeli de , hiç akım geçmediği (E_0) değerinden farklı bir (E_i) değerini alır. Akım

geçerken elektrot potansiyelinde meydana gelen değişime **polarizasyon** denir ve (η) ile ifade edilir ($\eta = E_i - E_o$).

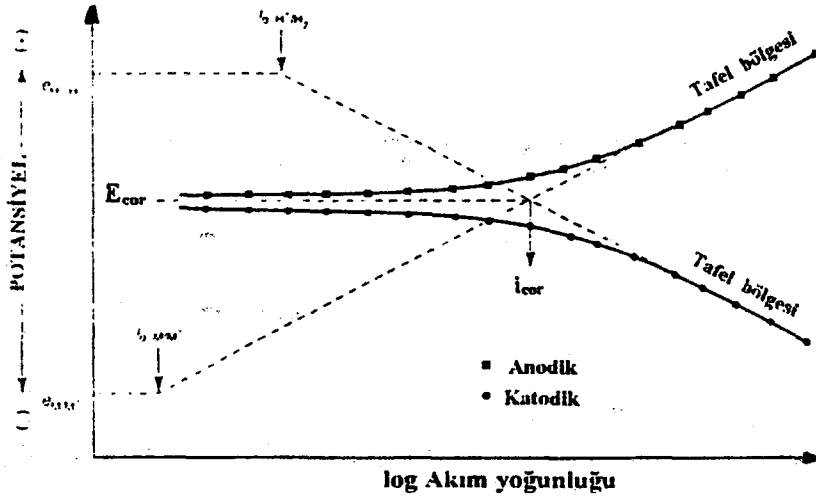
Polarizasyonun çeşitli şekilleri vardır. Akım devresinde daima bir R direnci bulunduğu için (IR) omik düşüşünden kaçınılamaz. Ayrıca anot ve katot reaksiyonlarına bağlı olarak da potansiyel düşüşü olur. Anot ve katotta meydana gelen polarizasyon, “**aşırı gerilim**” olarak adlandırılır. Denge halinde bulunan bir elektroda dıştan bir akım uygulanması halinde elektrot potansiyelinde meydana gelen değişimler Şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4 Bir elektroda dış akım uygulanması halinde anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin oluşması

Elektroda anodik yönde akım uygulandığında anot potansiyeli pozitif yönde artış gösterir. Katodik yönde akım uygulanması halinde elektrot potansiyeli negatif yöne doğru kayar. Uygulanan dış akım yoğunluğunun logaritması ile potansiyel değişimleri (polarizasyonlar) grafiğe alınırsa, Şekil 2.5’de verilen eğriler elde edilir (Jones, 1992; Yalçın ve Koç, 1998).

Şekil 2.5’de görülen E-log i polarizasyon eğrilerinde, uygulanan dış akım belli bir değere eriştikten sonra polarizasyon eğrileri lineer hale gelmektedir. Aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritmasının lineer olarak değiştiği bu bölgelere **Tafel bölgesi** denir. Bu bölge deneysel olarak elde edilerek korozyon hızının belirlenmesinde kullanılır (Jones, 1992; Yalçın ve Koç, 1998).



Şekil 2.5 Anodik ve katodik polarizasyon (E-log i) eğrileri

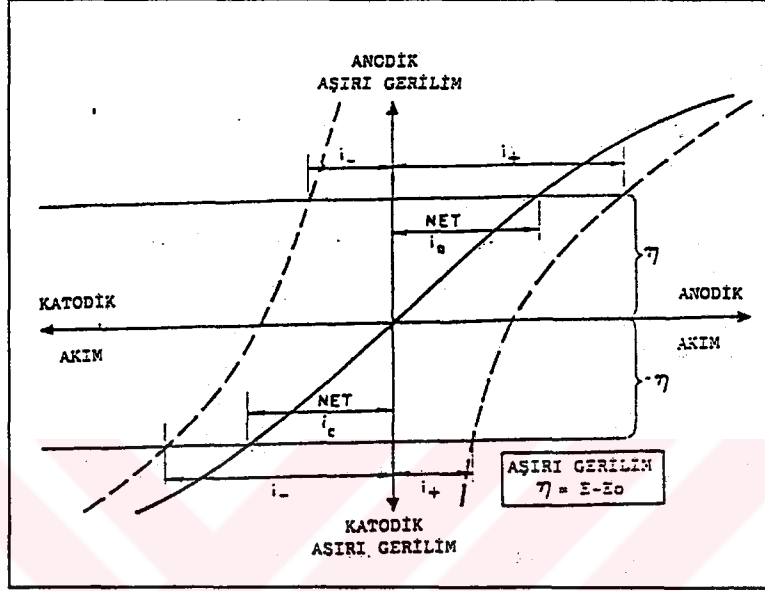
Yukarda açıklandığı üzere,korozyona uğrayan bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda yürürler. Bu durumda elektrot potansiyeli bir karma potansiyel değerine E_{cor} (korozyon potansiyeli) erişir. Bu potansiyele karşı gelen akıma da korozyon akımı i_{cor} denir. Örneğin çinkonun asidik ortamdaki korozyonunda çinko elektrodun anodik reaksiyonu ile ,hidrojen elektrodun katodik reaksiyonu birlikte yürür (Jones, 1992).

Şekil 2.6 Bir korozyon hücresinde karma potansiyelin oluşması

Şekil 2.6 'de görüldüğü gibi bu iki polarizasyon eğrisinin kesim noktasında bir korozyon potansiyeli oluşur. Çinkonun açık devre potansiyeli -0,76 Volt olduğu halde ,asidik ortamda korozyon potansiyeli -0,45 Volt dur.

2.2.1. Polarizasyon eğrileri

Polarizasyonlar içinde en anlamlısı aktivasyon polarizasyonudur. Bir elektrokimyasal reaksiyon yalnızca aktivasyon polarizasyonu kontrolü altında ise, bu reaksiyonun hızı Butler-Volmer denklemi ile ifade edilebilir. Aşırı gerilim ve akım arasındaki bu bağıntının diyagramı Şekil 2.7' de görülmektedir (Uhlig, 1971).



Şekil 2.7 Bir elektrot reaksiyonunda akım-potansiyel diyagramı.

- Anodik ve Katodik Polarizasyon Eğrileri

Uygulanan dış akım yoğunluğu ile elektrotlarda meydana gelen (η) aşırı gerilim arasında teorik olarak (2.10)'deki gibi bir bağıntı vardır ve Butler-Volmer denklemi olarak adlandırılır.

$$i = i_0 \left\{ \exp \frac{(1-\beta) F \eta}{RT} - \exp \frac{(-\beta F \eta)}{RT} \right\} \quad (2.10)$$

Bu bağıntı aşırı gerilimin çok küçük ve çok büyük değerleri için bazı kabuller yapılarak basitleştirilebilir.

- Çok büyük aşırı gerilimler :

Eğer elektrotlardaki aşırı gerilim $\eta > 50$ mV ise, bu durumda (2.10) eşitliğindeki ikinci terim birincinin yanında çok küçük kalacağından ihmal edilebilir.

$$\eta > + 50 \text{ mV} \text{ ise,}$$

$$i = i_0 \exp \left(\frac{(1-\beta) F \eta}{RT} \right)$$

$$\text{veya } \eta > -50 \text{ mV ise, } i = i_0 \exp \left(- \frac{\beta \eta F}{RT} \right)$$

elde edilir. Bu denklemin her iki yanının logaritması alınarak,

$$\ln i = \ln i_0 + \frac{(1-\beta) F \eta}{RT} \quad (2.11)$$

ve (η) aşırı gerilim değeri,

$$\eta = - \frac{RT}{(1-\beta)F} \ln i_0 + \frac{RT}{(1-\beta)F} \ln i \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu denklemde yalnız (η) ve (i) değişkendir. Sabit değerler (a) ve (b) ile gösterilirse denklem aşağıdaki şekli alır.

$$\eta = a + b \ln i \quad (2.13)$$

Bu denklem **Tafel Denklemi** olarak bilinir (Uhlig, 1971; Jones, 1992). Buna göre, yüksek aşırı gerilim değerlerinde, uygulanan dış akımın logaritması ile aşırı gerilim arasında lineer bir bağıntı vardır.

- Çok küçük aşırı gerilimler :

Aşırı gerilimin $\eta < 5 \text{ mV}$ olması halinde, Bütler- Volmer denklemindeki üstel terimler Mac Laurin serisine göre açılıp yalnız ilk iki terimi alınabilir.

$$i = i_0 \left\{ 1 + \frac{(1-\beta) F \eta}{RT} - 1 + \frac{\beta F \eta}{RT} \right\} \quad (2.14)$$

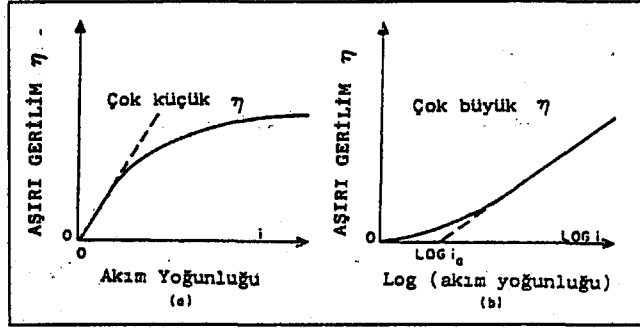
Burada kısaltmalar yapılarak ,

$$i = i_0 \frac{F \eta}{RT} \quad (2.15)$$

ve (η) aşırı gerilimi,

$$\eta = \frac{RT}{i_0 F} i \quad (2.16)$$

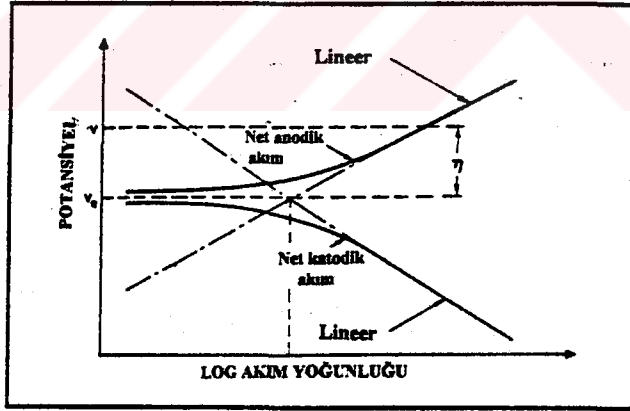
olarak elde edilir. Bu durumda da aşırı gerilimin akım yoğunluğuna göre lineer olarak değiştiği görülür (Şekil 2.8) (Doruk, 1982).



Şekil 2.8 Akım yoğunluğu ile aşırı gerilim arasındaki bağıntılar.

a) Küçük aşırı gerilimler b) Büyük aşırı gerilimler

Aktivasyon kontrolü altında olan elektrot reaksiyonlarında, küçük aşırı gerilim değerleri deneysel olarak belirlenerek (i_0) değerinin hesaplanması mümkün olabilir. Yüksek aşırı gerilimlerde yapılan deneyler ile de Tafel sabitlerinin belirlenmesi mümkündür. Bu yolla yapılan korozyon çalışmaları **Lineer Polarizasyon** metodu olarak bilinir (Şekil 2.9) (Uhlig, 1971; Jones, 1992).



Şekil 2.9 Anot ve katot polarizasyonunun akım yoğunluğu logaritması ile değişimi

Başlangıçta uygulanan dış akım yoğunluğu çok küçükken, aşırı gerilim değerleri de çok küçüktür. Bu bölgede (korozyon potansiyeli civarında) (i) akım yoğunluğu ile η aşırı geriliminin lineer olarak değiştiği görülür. Uygulanan dış akım belli bir değere eriştikten sonra, polarizasyon eğrisinde belirgin bir kırılma olur ve bu noktadan sonra aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritması lineer bir değişim gösterir. Bu bölge Tafel Bölgesi olarak

bilinir. Korozyon açısından Tafel bölgesinin başlamış olduğu noktanın potansiyeli ve Tafel doğrusunun eğimi çok önemlidir.

Uygulanan dış akım, korozyon akımının yaklaşık 100 katı olduğu zaman artık anodik akımlar katodik akım yanında ihmal edilecek kadar azalır. Bu noktadan itibaren aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritması arasında lineer bir bağıntı oluşur. Bu nokta, Tafel bölgesinin başlamış olduğu noktadır. Bu noktaya karşı gelen dış akım yoğunluğu katodik koruma akım ihtiyacı olarak alınabilir. Tafel bölgesinin başlamış olduğu potansiyel değeri de minimum polarizasyon sapması olarak katodik koruma kriteri olarak kullanılmaktadır.

2.2.2. Polarizasyon çeşitleri

Bir elektrottan net bir akım geçtiği zaman elektrot polarize olur. Polarizasyon değişik tiplerde olabilir. En basit polarizasyon, **direnç polarizasyonudur**. Elektrik devresinde daima bir direnç bulunduğu göre, akım geçişi ile birlikte IR voltaj düşmesi meydana gelir. Akım kesilirse, voltaj düşmesi de derhal kaybolur. Bir başka polarizasyon tipi de, **konsantrasyon polarizasyonudur**. Elektrotlardaki kimyasal reaksiyonlar sonucu bazı iyonlar reaksiyona girerek azalır veya bazı yeni iyonlar ortaya çıkar ve zıd EMK oluşur. Eğer akım kesilecek olursa bu polarizasyon difüzyon işleminin yarısı kadar bir süre içinde kaybolur. Bu polarizasyonun neden olduğu aktivasyon enerjisi birkaç kcal/mol civarındadır. Elektrotlardaki kimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisinin oluşturduğu polarizasyona **aktivasyon polarizasyonu** denir (Morgan, 1995). Reaksiyon aktivasyon enerjileri bir kaç on kcal/mol civarında olup, elektrot potansiyelleri üzerinde etkili olurlar. Bir elektrokimyasal hücrede akım aniden kesilecek olursa, IR düşüşü derhal kaybolur. Bunun hemen arkasından diğer polarizasyon etkileri de üstel bir fonksiyonla yavaş yavaş azalır. Böylece polarizasyon özellikleri yardımı ile elektrotlarda hangi reaksiyonların meydana geldiği hakkında fikir edinilebilir.

2.2.3. Limit akım yoğunluğu

Birçok halde, oksijen gibi sınırlı miktarda çözünebilen gazların neden olduğu korozyon hızı bir üst limite kadar artış gösterir. Örneğin korozyonun yürümesi için, oksijenin katot yüzeyine difüzlmesi ve anotta oluşan korozyon ürünlerinin de difüzlenererek anottan

uzaklaşması gerekir. Böyle bir korozyon olayında, korozyon hızı, ancak belli bir limit akıma kadar artırılabilir. Başlangıçta difüzyon hızları elektrot reaksiyonları için yeterli olur. Akım geçtikçe katot yüzeyine oksijen difüzyonu gittikçe güçleşir, aynı reaksiyon hızını sağlamak için potansiyeli artırmak gerekir. Potansiyelin artırılması elektrotlarda başka reaksiyonlarında meydana gelmesine neden olur.

2.2.4. Hidrojen aşırı gerilimi

Korozyon reaksiyonlarının bir çoğunda katotda hidrojen çıkışı meydana gelir. Elektrolitik kaplama olaylarında da katotta ayrılan metal ile birlikte hidrojen çıkışı da olabilir. Hidrojen çıkış reaksiyonu denge akım yoğunluğu değerleri değişik metaller için Çizelge 2.4'de verilmektedir (Morgan, 1985).

Çizelge 2.4 Değişik metaller üzerinde hidrojen çıkış reaksiyonu denge akım yoğunluğu

Metal	Denge Akım Yoğunluğu (Amp/cm ²)	Metal	Denge Akım Yoğunluğu (Amp/cm ²)
Pb, Hg	10 ⁻¹³	Fe, Au, Mo	10 ⁻⁶
Zn	10 ⁻¹¹	W, Co, Ta	10 ⁻⁵
Sn, Al, Be Ni	10 ⁻¹⁰	Pd, Rh	10 ⁻⁴
Ag, Cu, Cd	10 ⁻⁷	Pt	10 ⁻²

Çizelge 2.4' de görüldüğü üzere, kurşun, civa ve çinko gibi metaller üzerinde hidrojen çıkışı denge akım yoğunluğu çok küçüktür. Bu durumda, akımdaki çok küçük bir değişme elektrot potansiyelinde büyük değişmelere neden olur. Buna karşılık platin elektrotta akım yoğunluğu aynı derecede değiştirilse potansiyeldeki değişme önemsizdir. Bir başka deyişle, civa kurşun, çinko metalleri üzerinde hidrojen çıkışını sağlayabilmek için çok yüksek bir aşırı gerilime ulaşmak gerekir. Oysa platin grubu metaller üzerinde hidrojen aşırı gerilimi çok düşüktür.

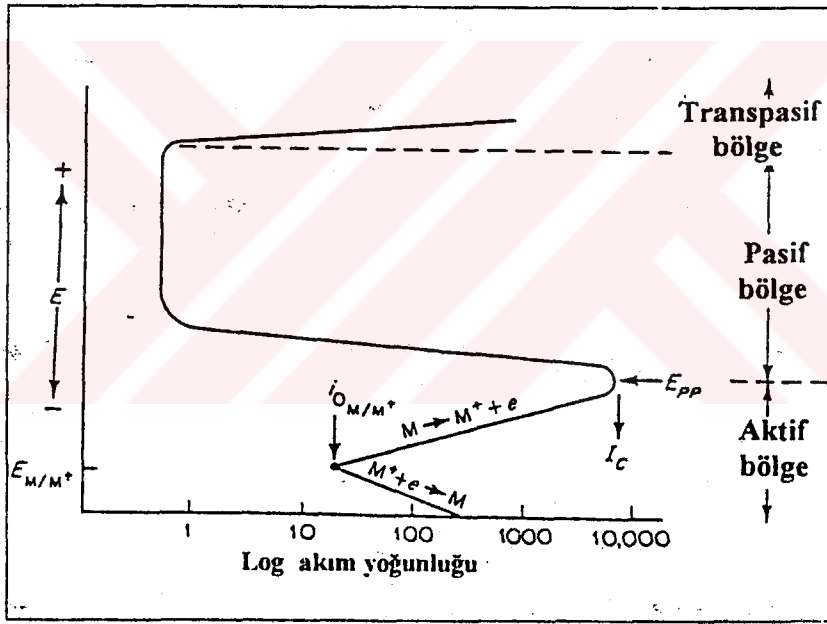
Eğer bir metal oksitleyici özelliği olmayan ve içinde çözünmüş oksijen de bulunmayan bir asit çözeltisinin etkisinde kalırsa, metalin korozyon hızını şu iki faktör belirler. Birincisi, Çizelge 2.1' de verilen standart elektrot potansiyelinin hidrojen elektroda göre farkıdır. Korozyon olayı başladığında metal yüzeyinde hidrojen aşırı gerilimi oluşur. İkincisi, gerçek korozyon hızını hidrojen aşırı gerilimi ile oluşan potansiyel farkı belirler. Örneğin çinkonun asitler içindeki korozyon hızı, denge potansiyelinin hidrojene göre büyüklüğü

göz önüne alındığında beklenenden daha yavaştır. Bunun nedeni çinko üzerinde hidrojen aşırı geriliminin yüksek oluşudur. Korozyon hızı , metal yüzeyinde bulunan ve çinkodan daha fazla potansiyel farkı olan safsızlıklar nedeniyle de artış gösterebilir.

Sonuç olarak , korozyon hızı pratikte anot ve katot arasındaki potansiyel farkına ve elektrot reaksiyonlarının polarizasyonuna bağlıdır. Denge akım yoğunluğu düşük olan ve küçük bir aşırı gerilim ile kolayca polarize edilebilen elektrotlarda korozyon olayı etkili şekilde kontrol edilebilir

2.3. Pasiflik

Pasifleşme özelliği olan bir metal anodik olarak polarize edilirse, Şekil 2.10'da görülen biçimde polarizasyon eğrileri elde edilir(Sherier, 1977).



Şekil 2.10 Pasifleşme özelliği olan bir metalin anodik polarizasyon eğrileri

Şekilde, havası giderilmiş bir asit çözeltisi içinde tipik bir anodik polarizasyon eğrisi şematik olarak verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, başlangıçta denge potansiyelinde itibaren potansiyel artırıldıkça korozyon hızı da artar. Bu bölge **aktif bölge** olarak tanımlanır. Metalin pasifleşme potansiyeli olan E_{pp} değerine erişildiğinde, pasifleşme başlar ve bu noktadan sonra potansiyelin hafif bir artışı ile korozyon hızında ani bir düşme

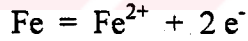
gözlenir. Korozyon hızı bir anda binde bir veya daha fazla düşer ve i_{pas} değerini alır. Pasif hale erişildikten sonra, potansiyel anodik yönde artırılmaya devam edilirse, korozyon hızının artık değişmediği görülür. Bu durum metal yüzeyinde oluşan pasif tabaka kırılincaya kadar devam eder. Metalin korozyon hızının sabit kaldığı bu bölge **pasif bölge** olarak tanımlanır. Potansiyel belli bir değere erişince pasif film kırılarak bozulur. Bu noktadan sonra korozyon hızında yeniden artış görülür. Böylece **transpasif bölge** başlamış olur. Pasif bölgenin büyüklüğü metalin içinde bulunduğu ortam koşullarına göre değişir. Asitlik ve sıcaklık arttıkça pasif bölge gittikçe daralır. Buna karşılık pasif bölgenin korozyon hızında (i_{pas}) artış görülür.

2.4. Termodinamik Açıdan Korozyon

Bir kimyasal reaksiyonun kendiliğinden yürüyüp yürüyemeyeceği termodinamik yöntemlerle kesin olarak belirlenebilir. Termodinamik yasalarına göre bir kimyasal reaksiyon ancak serbest enerji değişimi negatif ($\Delta G < 0$) olduğu zaman kendiliğinden yürüyebilir. O halde belli bir ortamda anot ve katot reaksiyonlarının toplamından oluşan korozyon reaksiyonunun serbest enerji değişimi hesaplanarak korozyonun meydana gelip gelmeyeceği belirlenebilir. Bunu bir örnek ile açıklayalım.

Örneğin demirin, $pH = 4$ olan (oksijensiz) bir sulu çözelti içinde korozyona uğrayıp uğramayacağını inceleyelim.

Anot reaksiyonu ,



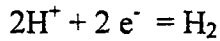
Korozyonun gerçekleşmesi halinde en az $[Fe^{2+}] = 10^{-6}$ mol/l olması gerekir. Buna göre anot denge potansiyeli,

$$E = 0,44 - 0,059/2 \log 10^{-6} = 0,62 \text{ Volt}$$

Anot reaksiyonunun serbest enerji değişimi,

$$\Delta G = - nFE = - 2 \times 96500 \times 0,62 = - 119,7 \text{ kJ/mol}$$

Katot reaksiyonu,



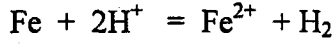
Katot potansiyeli,

$$E = 0 - 0,059/2 \log 1 / (10^{-4})^2 = - 0,236 \text{ Volt}$$

Katot reaksiyonu serbest enerji değişimi

$$\Delta G = - nFE = - 2 \times 96500 (- 0,236) = 45,5 \text{ kJ/mol}$$

Toplam korozyon reaksiyonu anot ve katot reaksiyonlarının toplamından oluşur.



Bu reaksiyonun serbest enerji değişimi,

$$\Delta G_{\text{korozyon}} = \Delta G_{\text{anot}} + \Delta G_{\text{katot}}$$

$$\Delta G_{\text{korozyon}} = -119,7 + 45,5 = -74,2 \text{ kJ/mol}$$

bulunur. Bu sonuç, $\Delta G < 0$ olduğu için demirin pH = 4 olan sulu çözelti içinde korozyona uğrayabileceğini göstermektedir. Ancak termodinamik olarak korozyon hızı hakkında bir fikir edinebilmek mümkün değildir. Korozyon hızı ancak reaksiyon kinetiği incelenerek anlaşılabilir. Örneğin pasifleşme nedeniyle korozyon hızı pratikte önemsiz sayılacak kadar küçük olabilir. Bu durumda korozyon bir tehlike yaratmayabilir. Korozyon reaksiyonunun serbest enerji değerinin pozitif olması ($\Delta G > 0$) halinde korozyon olayının meydana gelmeyeceği kesin olarak söylenebilir (Çakır, 1990).

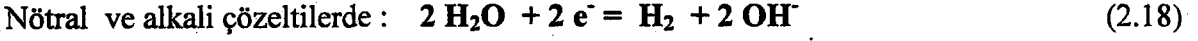
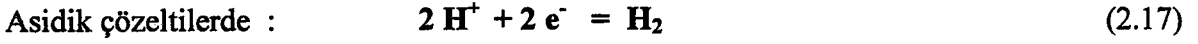
2.4.1. Potansiyel - pH diyagramları

Yukarda açıklanan termodinamik yöntemlerle bir metalin sulu çözeltiler içinde korozyon bakımından aktif veya pasif halde olduğu çözeltinin pH derecesi ve metalin çözelti içindeki elektrot potansiyeli grafiğe geçirilerek kesin şekilde belirlenebilir. İlk olarak Marcel Pourbaix tarafından ortaya konulan bu potansiyel-pH diyagramları **Pourbaix Diyagramları** olarak bilinir. Bütün metaller için özel Pourbaix diyagramları hazırlanabilir. Bu diyagramlar muhtemel kimyasal reaksiyonlar göz önüne alınarak her bir bileşenin kararlı halde olduğu bölgeler termodinamik yöntemlerle belirlenerek hazırlanır. Bölgeler arasındaki sınır çizgileri **Nernst Denklemi** yardımı ile belirlenir.

Pourbaix diyagramları, söz konusu olan metalin sulu çözeltiler içinde korozyona uğramadığı bölgeyi kesinlikle ortaya koyar. Metalin korozyona uğramasının mümkün olduğu bölgelerde ise, gerçekte korozyon olayı gözlenmeyebilir. Bu bölgelerde metal termodinamik olarak stabil halde değildir. Ancak korozyon hızı çok yavaş olabilir, veya korozyon reaksiyonunu fiziksel olarak engelleyen (örneğin pasifleşme veya kabuk oluşması gibi) kinetik bir olay söz konusudur. Pourbaix diyagramları kullanılırken bu durum gözden kaçırılmamalıdır.

• **Su için Pourbaix Diyagramı**

Su elektroliz edilirse katotta hidrojen çıkışı olur. Suyun pH derecesine göre hidrojen çıkış reaksiyonları şöyledir.

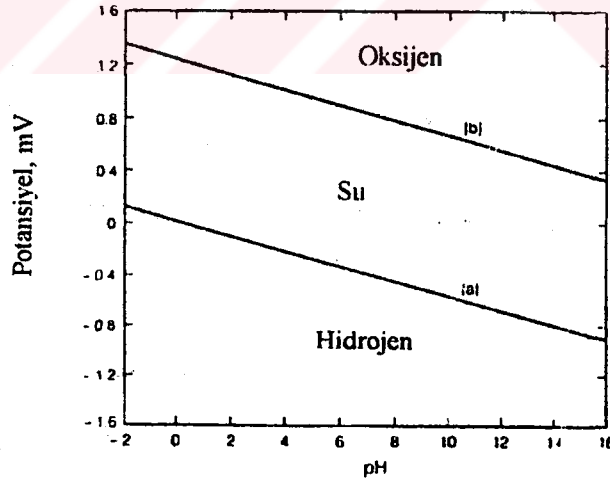


Nernst denkleminde göre bu reaksiyonların denge potansiyeli,

$$E_{\text{H}^+/\text{H}_2} = E^{\circ}_{\text{H}^+/\text{H}_2} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_{\text{H}_2}}{a_{\text{H}^+}} \quad (2.19)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde $P_{\text{H}_2} = 1 \text{ atm}$ olduğu göz önüne alınırsa,

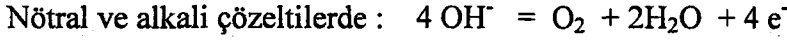
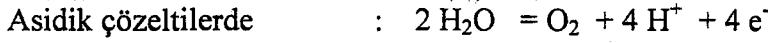
$E_{\text{H}^+/\text{H}_2} = 0,0 - 0,059 \text{ pH}$ elde edilir. Yani sulu bir çözelti içinde hidrojen çıkış potansiyeli doğrudan çözelti pH değerine bağlıdır. $\text{pH} = 0$ ise, $E = 0 \text{ Volt}$ 'da ve $\text{pH} = 7$ ise, $E = -0,413 \text{ Volt}$ 'da hidrojen çıkışı başlar. Çözeltinin pH derecesi arttıkça, elektrot potansiyelinin negatif yönde lineer olarak arttığı görülür. pH değeri ile potansiyel arasındaki bu bağıntı Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Su için potansiyel -pH diyagramı (Shrier, 1977)

Şekilde (a) doğrusu hidrojen çıkışına karşı gelir. Bu doğru üzerinde hidrojen çıkış reaksiyonu denge halindedir. Doğrunun altında, yani daha negatif potansiyelerde reaksiyon

hidrojen çıkışı yönünde gelişirken, daha pozitif potansiyel değerlerinde, yani (a) doğrusunun üzerinde su termodinamik olarak stabil halde bulunur. Elektrot potansiyelinin pozitif değerlerinde suyun elektrolizinde aşağıdaki reaksiyonlara göre oksijen çıkışı meydana gelir veya diğer bir ifade ile,



Oksijen çıkışında $P_{\text{O}_2} = 1 \text{ atm}$ olduğu göz önüne alınarak Nernst denklemi yazılacak olursa, bu reaksiyonların denge potansiyeli,

$$E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} = E^{\circ}_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} - 0,059 \text{ pH}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $E^{\circ}_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} = 1,227 \text{ Volt}$ olduğu göz önüne alınırsa, suyun elektrolizinde oksijen çıkış potansiyeli için,

$$E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} = 1,227 - 0,059 \text{ pH}$$

bağıntısı bulunur. Burada $\text{pH} = 7$ değeri yerine konulursa, nötral bir suda oksijen çıkışının $E = 0,814 \text{ Volt}$ 'da başlamış olduğu anlaşılır.

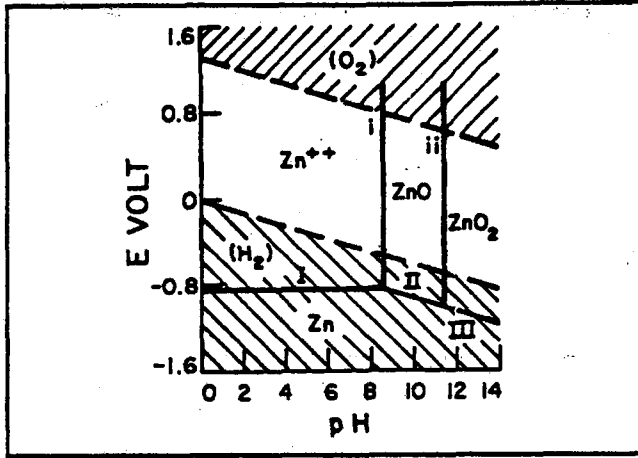
Şekil 2.11'da görülen (b) doğrusu suyun ayrışması ile oksijen çıkışı reaksiyonuna karşı gelir. Eğer potansiyel daha pozitif ise su ayrışarak oksijen çıkar. Eğer potansiyel değeri (b) doğrusunun altında ve fakat (a) doğrusu üstünde bulunuyorsa, bu durumda su stabil halde kalır. Yukarıda nötral çözeltiler için verilmiş olan reaksiyon tersine döner. Eğer su içinde çözünmüş oksijen varsa redüklenerek OH^- iyonu oluşturur.

Sonuç olarak ifade etmek gerekirse Şekil 2.11'de verilen diyagramda termodinamik olarak stabil olan üç bölge bulunur. (a) doğrusu altında kalan bölgede su ayrışarak hidrojen çıkışı meydana gelir. (a) ve (b) doğruları arasında kalan bölgede su stabil haldedir. Yani ne hidrojen ne de oksijen çıkışı söz konusu olmaz. (b) doğrusunun üstünde kalan bölgede ise, hem asidik hem de alkali ortamlarda suyun ayrışması ile oksijen çıkışı meydana gelir.

• Çinko+Su İçin Pourbaix Diyagramı

Buna benzer olarak metaller içinde E - pH diyagramları hazırlanmıştır. Bu durumda su için çizilmiş olan bu doğrulara ek olarak, söz konusu metal ve onun korozyon sonucu oluşan bileşikleri için de denge diyagramları çizilebilir. Örnek olarak basit kimyasal reaksiyonların söz konusu olduğu çinko metalini seçelim. Bu grafiklerin hazırlanmasında

korozyon bölgelerini belirlemek için, çözeltide 10^{-6} mol/l metal iyonu bulunması halinde korozyonun başlamış olduğu kabul edilir. Bu reaksiyonlara göre elde edilen değerlerin E-pH diyagramı da Şekil 2.12'de verilmektedir.



Şekil 2.12 Su içindeki çinko için basitleştirilmiş Pourbaix diyagramı (Shreir, 1977)

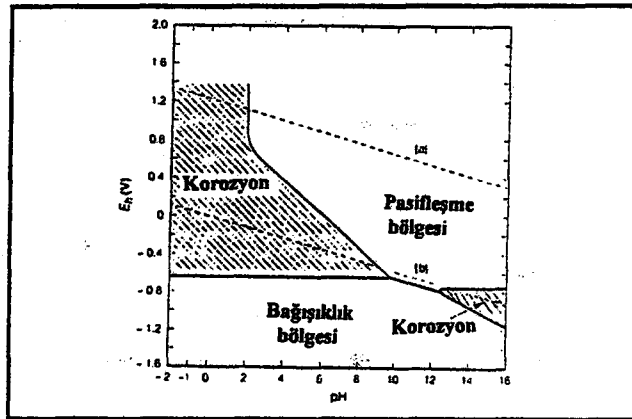
• Demir + Su Sistemi İçin Pourbaix Diyagramı

Demirin su içinde çözünen iyonları ve katı haldeki korozyon ürünleri şunlardır:

İyonlar : Fe^{2+} , Fe^{3+} , HFeO_2^-

Katı ürünler : FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$

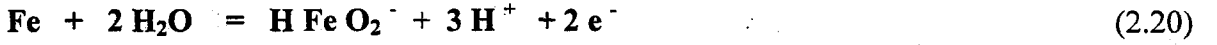
Demir + su sistemi için hazırlanmış olan Pourbaix diyagramı Şekil 2.13'de verilmektedir.



Şekil 2.13 Demir + su sistemi için Pourbaix diyagramı(Shreir, 1977)

Diyagramda demirin korozyon açısından durumunu belirten üç bölge vardır.

Korozyon Bölgeleri : Potansiyelin - 0,65 Volt'dan (SHE) daha pozitif ve pH'ın 9 dan küçük olduğu bölgede demir Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonları oluşturarak korozyona uğrar. Alt kısımlarda demir-2 , üst bölgelerde demir-3 iyonları stabildir. Diğer korozyon bölgesi, potansiyelin -0,80 Volt ile -1,2 Volt arasında ve pH'ın 13 den büyük olduğu dar bir aralıktır. Bu bölgede demir,



reaksiyonu ile korozyona uğrar.

Başıklık Bölgesi : Demir - 0,62 Volt'dan daha negatif potansiyelde iken termodinamik olarak stabil haldedir. Bu bölgede demir korozyona uğramaz. Potansiyel bu bölgede tutulabilirse demir katodik olarak korunur. Hidrojen elektroda göre -0,62 olan bu potansiyel değeri doygun bakır / bakır sülfat referans elektrodu ile -0,850 Volt'a karşı gelir. Bu değer demir ve çeliğin katodik korumasında kriter olarak kullanılır.

Pasiflik Bölgesi : Bu bölgede demir yüzeyinde Fe_3O_4 veya Fe_2O_3 oksitleri oluşur. Bunlar metalin pasif halde kalmasına neden olur. Oluşan oksit tabakasının bileşimi ve yapısı ortam koşullarına bağlıdır.

Böylece hazırlanmış olan diyagramlar metallerin korozyon davranışları hakkında fikir edinmek için kullanılabilir. Burada önemle belirtelim ki, Pourbaix diyagramları yalnızca denge hallerini gösterir. Bu diyagramlarda hangi reaksiyonların hangi bölgede gerçekleşeceğini önceden belirleyebilmek mümkün olur. Ancak korozyon hızının belirlenmesi için termodinamik dışında reaksiyon kinetiği ile ilgili ek bilgilere de ihtiyaç vardır. Örneğin çözünmeyen korozyon ürünlerinin stabil olduğu bölge pasiflik bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede, pratik olarak korozyonun etkili olarak yürüyüp yürümiyeceği hakkında kesin bir karar verilemez. Bu durum ancak deneysel olarak ortaya konulabilir. Korozyon ürünlerinin yüzeye yapışması ve sağlamlığı pasifliğin oluşmasında rol oynar. Buna karşılık metalin stabil olduğu “immunity” bölgesinde korozyonun

olmayacağı kesin olarak söylenebilir. Fakat korozyonun aktif olarak yürüdüğü bölgelerde korozyonun hangi boyutlarda oluşacağı Pourbaix diyagramlarından anlaşılamaz.

Korozyon hızı çeşitli yöntemler ile tayin edilebilir. Başlangıçta korozyon hızı yalnızca birim yüzeyde ve birim zamanda meydana gelen kütle kaybı örneğin ($mdd = mg / dm^2.gün$) olarak ağırlık kaybı yöntemi ile tayin edilmekteydi. Son zamanlarda galvanostatik veya potansiyostatik ölçümlerle elde edilen polarizasyon eğrileri değerlendirilerek Tafel ekstrapolasyon veya lineer polarizasyon yöntemleri ile korozyon hızı çok kısa zaman içinde tayin edilebilmektedir.

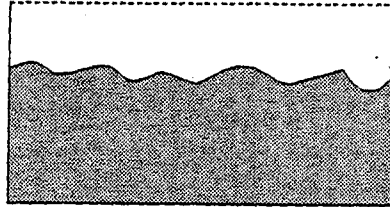
3. KOROZYON ÇEŞİTLERİ

Çeşitli ortamlarda, değişik etkilerle ve mekanizmalarla oluşan korozyon olayları birbirinden farklıdır . Değişik metaller, içinde bulundukları ortamın özelliklerine göre çeşitli şekillerde korozyona uğrarlar. Başlıca korozyon tipleri pratik olarak 17 grup altında toplanabilir (Çizmecioğlu, 1998; Yalçın ve Koç, 1998).

- 1- Üniform (Homojen) korozyon
- 2- Galvanik korozyon
- 3- Çatlak korozyonu
- 4- Kabuk altı korozyonu
- 5- Filiform korozyon
- 6- Çukur korozyonu
- 7- Taneler arası korozyon
- 8- Seçimli korozyon
- 9- Erozyonlu korozyon
- 10- Aşınmalı korozyon
- 11- Yorulmalı korozyon
- 12- Stres (Gerilmeli) korozyonu
- 13- Hidrojen kırılabilirliği
- 14- Mikrobiyolojik korozyon
- 15- Yüksek sıcaklık korozyonu
- 16- Kaçak akım korozyonu
- 17- Metal olmayan malzemelerdeki korozyon

3.1. Üniform Korozyon

Metal yüzeyinin her noktasında aynı hızla yürüten korozyon çeşididir (Şekil 3.1). (Çizmecioğlu, 1998)



Şekil 3.1 Üniform (Homojen) Korozyon

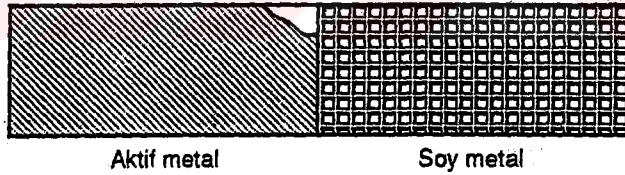
Normal olarak korozyon olayının bu şekilde yürümesi beklenir. Metal kalınlığı her noktada aynı derecede incelir. Pratikte üniform korozyon olayı fazla tehlike oluşturmaz. Metal kalınlığı her noktada aynı kalır ve malzeme hesaplanan ömrüne kadar dayanıklılığını korur.

3.2. Galvanik Korozyon

İki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Bu tip korozyona çok rastlanır. En çok rastlanan galvanik korozyon nedenleri şunlardır.

- Eski borular ile yeni boruların birbirine bağlanması halinde,
- Zemin cinsi ve yapısının değişmesi halinde boru hatlarında ve çelik kazıklarda,
- Yeraltı suyunun bulunduğu ve bulunmadığı bölgeler arasında,
- Farklı hava (oksijen) alabilen bölgeler arasında, konsantrasyon pili olarak anot ve katot bölgeleri oluşabilir.

İki farklı metal bir korozif ortama daldırılır ve elektriksel bir bağ ile birbirine bağlanırsa, bir pil oluşur. Bu metallere elektrod potansiyeli daha elektronegatif olan metal anot olarak korozyona uğrar. Korozyon hızı iki metal arasında oluşan potansiyel farkına bağlıdır (Şekil 3.2) (Çizmecioğlu, 1998).



Şekil 3.2 Galvanik korozyon

Galvanik korozyonda metallere daha soy olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur. Bu hücrede yalnız anot olan metal korozyona uğrar. Korozyon hızı her iki metalin elektrot potansiyelleri arasındaki farka bağlıdır. Metallerden hangisinin anot olacağı elektrot potansiyeli göz önüne alınarak anlaşılabilir. Çizelge 2.1’de verilen standart EMK serisinde standart EMK serisi bulunan bir metal, kendinden daha aşağıda olan metallerle göre anot olur. Ne var ki, korozyon olaylarında metaller hiç bir zaman kendi iyonları ile denge halinde bulunmaz. Bu nedenle galvanik korozyon olaylarında standart elektrod

potansiyelleri yerine, galvanik seride (Çizelge 2.2) yer alan deniz suyu içindeki potansiyellerinin alınması daha uygundur.

Galvanik bir hücrede korozyon hızı, yürütücü kuvvet olan anot ve katot arasındaki potansiyel farkına bağlıdır. Ancak bu fark, polarizasyon nedeniyle zamanla azalır. Polarizasyon genellikle katot bölgesinde görülür. Galvanik korozyon hızına aynı zamanda, çevre elektrolitin iletkenliği ve katot/anot yüzey alanı oranı da etki yapar. Eğer elektrolitin iletkenliği yüksek ise korozyon geniş bir alanda kendini gösterir. İletkenliğin düşük olması halinde iki metalin temas ettiği bölgede dar bir alanda şiddetli olarak ortaya çıkar. Katot/anot yüzey alanı oranı da pratikte büyük önem taşır. Bu oranın büyük olması yani büyük bir katot yüzeyine karşı anot yüzey alanının küçük olması, anot akım yoğunluğunun artmasına ve dar bir bölgede şiddetli korozyon oluşmasına neden olur. Galvanik korozyona karşı şu önlemler alınabilir:

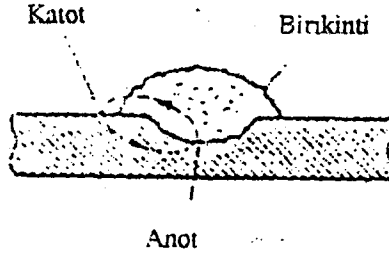
- Galvanik seride birbirinden uzak konumda olan metallerin teması önlenmelidir.
- Eğer bu iki metalin bir arada kullanılması zorunlu ise, büyük katot-küçük anot yüzeyinden kaçınılmalıdır.
- İki metal arasındaki bağlantılar izole flanşlarla elektriksel olarak yalıtılmalıdır.
- Metal yüzeyleri boya veya kaplama yapılarak izole edilmelidir.
- Eğer kapalı bir sistem söz konusu ise inhibitör kullanılmalıdır.
- Tasarım sırasında anot olan parçanın daha kolayca yenisi ile değiştirilebilmesi için önlem alınmalıdır veya bu parça daha kalın olarak imal edilmelidir. Veya sisteme her iki metalden de daha anodik karakterde olan üçüncü bir metal bağlanmalıdır.

3.3. Çatlak Korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan ince bir çatlak, dar bir aralık, cep, veya iki levha arasında kalan boşluk içine çevrede bulunan elektrolitin girmesi zordur. Bu dar alanlar durgun bir bölge oluşturur. Bu bölgelerde korozyon hızı normal yüzeylere göre daha fazladır. Bu tip korozyon olayı **çatlak korozyonu** olarak tanımlanır.

3.4. Kabuk Altı Korozyonu

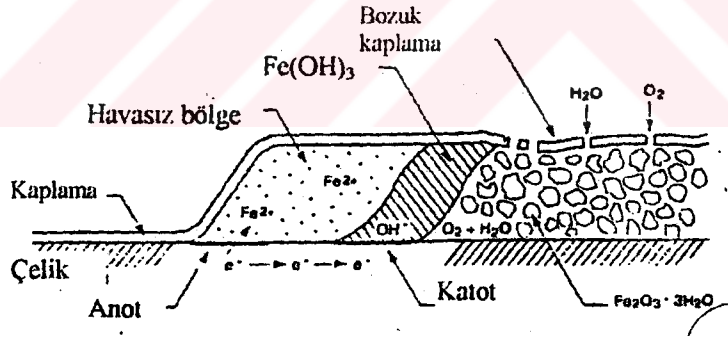
Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk (birikinti) altında meydana gelen korozyona **kabuk altı korozyonu** denir (Şekil 3.3) (Yalçın ve Koç, 1998; John, 1991).



Şekil 3.3 Kabuk altı korozyonu oluşumu

3.5. Filiform Korozyonu

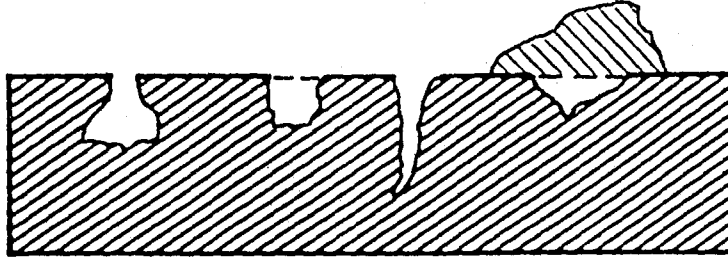
Metal yüzeyinde bulunan boya veya kaplama tabakası altında yürüyen bir korozyon olayıdır. Filiform korozyon, çatlak korozyonunun bir türü olarak kabul edilebilir. Bu korozyona kabuk altı korozyonu da denilmektedir. Korozyon olayı kabuk altında bir solucan hareketine benzer şekilde hareket eder. Bir filiform diğer bir filiformu kesmez. Kesişme halinde yansıma yaparak yoluna devam eder (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Filiform korozyonu

3.6. Çukur Korozyonu (Pitting)

Metal yüzeyinde çok küçük bir bölgede çukur oluşturarak meydana gelen korozyon olayıdır. Çoğu zaman oluşan çukurlar gözle görülemeyecek kadar küçüktür. Çukurların derinliği genellikle çapları kadardır (Şekil 3.5) (Yalçın ve Koç, 1998).



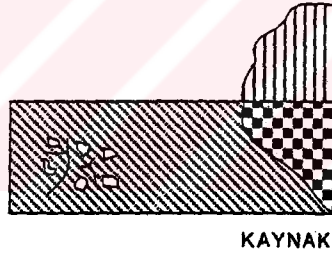
Şekil 3.5 Çukur korozyonu

3.7. Taneler Arası Korozyon

Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona **taneler arası korozyon** denir (Çakır, 1990).

3.7.1. Kaynak çürümesi

Paslanmaz çeliklere kaynak yapılamamasının nedeni, taneler arası korozyon olayıdır. Bu olay kaynak çürümesi olarak bilinir (Şekil 3.6) (Çizmecioğlu, 1998).



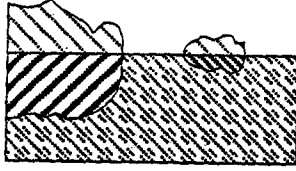
Şekil 3.6 Kaynak yapılan bölgede taneler arası korozyon

3.7.2. Bıçak hattı etkisi

Kaynak yapılan bölgenin her iki yanında dar bir bölgede, uzun bir hat boyunca taneler arası korozyon etkisine benzer bir korozyon olayı meydana gelir. Buna bıçak hattı etkisi denir. Bu etki kaynak yapılan yerde değil, onun hemen yakınında bir hat boyunca ortaya çıkar.

3.8. Seçimli Korozyon

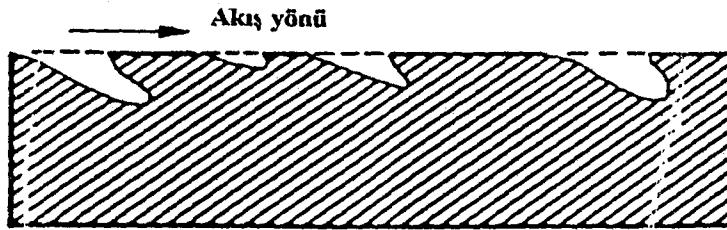
Bir alaşım içinde bulunan elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyon olayıdır. Bu tip korozyona en iyi örnek, pirinç alaşımı içinde bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğramasıdır. Bu seçimli korozyona özel olarak **dezinsifikasyon** adı verilir (Şekil 3.7) (Çizmecioğlu, 1998).



Şekil 3.7 Dezinsifikasyon korozyonu

3.9. Erozyonlu Korozyon

Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında erozyon da meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni, oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir. Erozyonlu korozyonun tipik bir görünüşü vardır. Akış yönünde göz ile görünen oyuklar ve dalga biçiminde yuvarlak oluklar oluşur (Şekil 3.8) (Yalçın ve Koç, 1998).

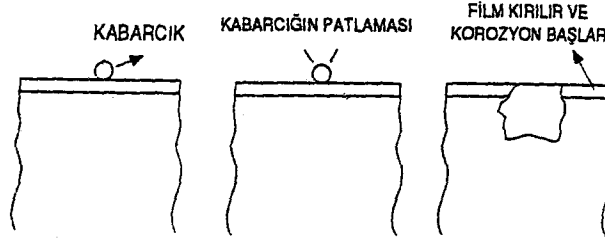


Şekil 3.8 Erozyonlu korozyon

3.9.1. Kaviteasyon

Kaviteasyon, erozyonlu korozyon olayının özel bir şeklidir. Akışkan içinde bir gaz veya buhar kabarcığının bulunması halinde, bu basınçlı gaz metal yüzeyi üzerinde bulunan

herhangi bir engel nedeniyle patlayarak o bölgede yıpranmaya neden olabilir. Bu olay genellikle hidrolik türbinlerde, gemi pervanelerinde ve pompa paletlerinde ortaya çıkar. Kaviteasyon olayının meydana gelişi Şekil 3.9'da görülmektedir (Çizmecioğlu, 1998).



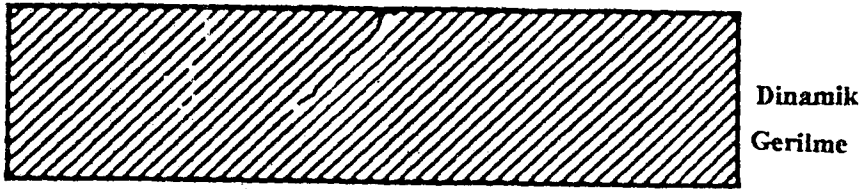
Şekil 3.9 Kaviteasyon olayının meydana gelişi

3.10. Aşınmalı Korozyon

Birbiri ile sürtünen veya yük altında vibrasyon yapan metallerde aşınma görülür. Bu olay, söz konusu ortamda oluşan korozyon hızını artırıcı rol oynar. Bunu önlemek için, ya yüzeyler yağlanır, ya da iyice birbirine tutturularak sürtünme hareketi önlenir.

3.11. Yorulmalı Korozyon

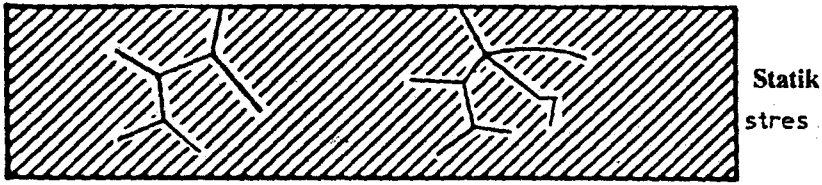
Periyodik olarak yükleme- boşaltma şeklinde etkiyen dinamik bir stres altında bulunan bir metal zamanla yorulur. Yorulmuş halde bulunan metal, normalden daha küçük gerilmelerin etkisi ile çatlayabilir. Yorulma ve korozyonun birlikte etkisi metalin kısa sürede çatlamasına neden olur (Şekil 3.10) (Yalçın ve Koç, 1998).



Şekil 3.10 Yorulmalı korozyon ile oluşan çatlama

3.12. Stres Korozyonu (Gerilmeli Korozyon)

Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilme altında ise, metalin çatlayarak kırılması çabuklaşır. Metal yüzeyinde bulunan herhangi bir çukur veya hendek gerilim altında duyarlı hale gelerek korozyonun başlaması için uygun bir ortam yaratır. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, stres altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur (Şekil 3.11) (Yalçın ve Koç, 1998).



Şekil 3.11 Stres korozyon çatlaması

3.13. Hidrojen Kırılgenliği

Bir korozyon reaksiyonu sonucu veya katodik koruma uygulamasında metal yüzeyinde hidrojen atomları oluşur. Bunlar metal yüzeyinde adsorbe edilir. Metal içinde bulunan hidrojen molekülleri metal boşluklarında büyük bir basınç oluşturarak metalin çatlamasına neden olur (Atkinson, 1983).

3.14. Mikrobiyolojik Korozyon

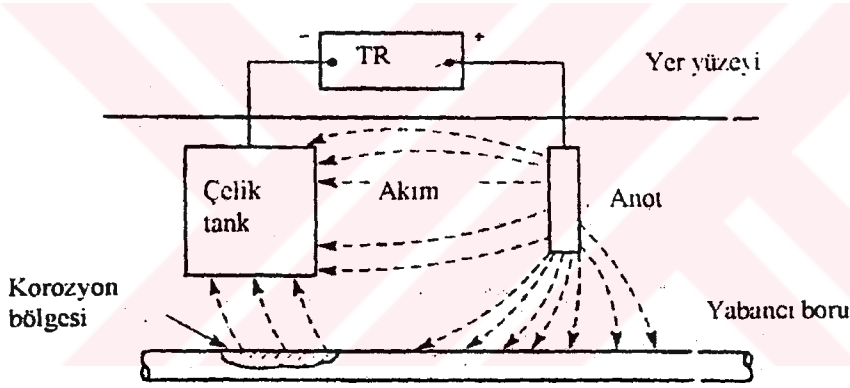
Mikrobiyolojik korozyon normal korozyon olaylarından farklı yapıda olmayıp, mikrobiyolojik olarak bazı agresif iyonların korozyon reaksiyon hızını artırması şeklinde kendini gösterir. Mikrobiyolojik korozyon büyük oyuklar meydana getirir ve genellikle tabanda oluşur. Yakından incelenirse daha çok bir organizmanın büyümesine benzer şekilde olduğu görülür. Mikrobiyolojik korozyon olayına soğutma suyu sistemlerinde özellikle durgun bölgelerde çok sık rastlanır (Jones, 1992).

3.15. Yüksek Sıcaklık Korozyonu

Havadaki oksijen veya diğer agresif gazlar ile yüksek sıcaklıkta meydana gelen korozyon olayı da, doğrudan olmasa bile yine de elektrokimyasal temele dayanır.

3.16. Kaçak Akım Korozyonu

Bu tip korozyon olayına yeraltı ve su altı yapılarında sık rastlanır. Her hangi bir doğru akım kaynağından yeraltına kaçan akımlar çevrede bulunan metalik yapılara girerek korozyona neden olurlar. Şekil 3.12 'de bir anot yatağı yakınından geçen yabancı bir boru hattında meydana gelen kaçak akım korozyonu görülmektedir. Boru hattı zeminden daha iletken olduğu için kaçak akımlar boru hattına girmeyi tercih eder. Akımın boru hattına girdiği noktalar katot olur. Bu noktalarda korozyon söz konusu olmaz. Fakat akımın borudan çıktığı bölgeler anot olarak korozyona uğrar (Parker, 1967).



Şekil 3.12 Bir anot yatağı yakınından geçen yabancı boru hattında oluşan kaçak akım korozyonu

4. KOROZİF ORTAMLAR VE KOROZYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ

Korozyon, metallerin içinde bulundukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girerek metalik özelliklerini kaybetmeleri olayıdır. Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp normal koşullar altında bile korozyona uğrayabilir. Bütün metaller doğada mineral olarak bulundukları hale dönüşmek eğilimindedir. Doğada bulunan mineraller, söz konusu metalin en düşük enerji taşıyan bileşiği yani en stabil halidir. Bu mineraller özel metalurjik yöntemlerle ve enerji harcanarak metal haline getirilir. Ancak metallerin çoğu element halinde termodinamik olarak stabil değildir. Uygun bir ortamın bulunması halinde üzerinde taşımış oldukları kimyasal enerjiyi geri vererek yeniden minimum enerji taşıyan stabil bileşikler haline dönüşmek isterler. Bu nedenle korozyon olayı enerji açığa çıkararak kendiliğinden yürür. Bazı soy metaller hariç teknolojik öneme sahip bütün metal ve alaşımlar korozyona uğrayabilir.

Korozyon reaksiyonunun yürütücü kuvveti, reaksiyon sırasında açığa çıkan enerji yani serbest entalpi azalışıdır. Termodinamik olarak, bir reaksiyonun kendiliğinden yürümesi için, reaksiyon serbest entalpi değişiminin mutlaka negatif olması gerekir. Buna göre herhangi bir metalin belli bir ortamda korozyona uğrayıp uğramayacağı, serbest entalpi değişiminin işaretine bakılarak kolayca anlaşılabilir. Eğer serbest entalpi değişiminin işareti pozitif ise , metalin söz konusu ortamda korozyona uğramayacağı kesin olarak söylenebilir. Bunun tersi , yani serbest entalpi değişiminin negatif olması korozyon olayının olabileceğini gösterir. Ancak bazı hallerde metalin termodinamik açıdan korozyona uğraması beklendiği halde, pratikte reaksiyonun yürümediği veya önemsiz derecede yavaş yürümekte olduğu görülür. Bu durum kabuk oluşumu ve pasifleşme gibi nedenlerle reaksiyon hızının azalmasından kaynaklanır. Pasifleşme nedeniyle bir çok metalin korozyon hızı pratikte önemsenmeyecek kadar küçüktür. Buna karşılık endüstrinin temel yapı malzemesi olan demir ve çelik sulu ortamlarda ve atmosferde korozyona dayanıksız bir metaldir.

Korozyon olayı endüstrinin her bölümünde kendini gösterir. Açık atmosferde bulunan tanklar, depolar , direkler, korkuluklar, taşıt araçları, yeraltı boru hatları, betonarme demirleri , fabrikalarda kimyasal madde doldurulan kaplar, borular, depolar ve bir çok

makine parçası korozyon olayı ile karşı karşıyadır. Bütün bu yapılar korozyon nedeniyle beklenenden daha kısa sürede işletme dışı kalmakta ve büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir. Korozyon kayıpları ülkelerin gayri safi milli hasılasının yaklaşık % 3,5 -4,5 ' u kadardır. 1976 yılında Amerika Birleşik Devletindeki korozyon kaybı 70 milyar dolar / yıl, 1982 yılında 126 milyar dolar / yıl olarak hesaplanmıştır .Özel yöntemlerle elde edilen bu değerler yanıltıcı olabilir. Çünkü kayıplar hiç korozyon olmaması hali temel alınarak yapılmıştır. Korozyon olaylarının tam olarak yok edilebildiği böyle bir kabul gerçeğe uygun değildir. Gerçekte korozyon kayıplarının ancak belli bir yüzdesini önleyebilmek mümkün olabilir. Önlenebilir korozyon yüzdesi toplam korozyon olaylarının yaklaşık olarak % 30 ' u civarındadır. Korozyon kayıplarının maliyetinin hesabı çok zordur. Bu zorluk korozyon nedeniyle meydana gelen malzeme ve işçilik kaybı yanında gözle görülmeyen bazı yan kayıpların belirlenmesinden kaynaklanır. Korozyonun doğrudan neden olduğu malzeme ve işçilik kaybına , korozyon nedeniyle ortaya çıkan diğer kayıpların da dahil edilmesi gerekir. Korozyonun neden olduğu dolaylı kayıpları beş maddede toplayabiliriz (Shreir, 1977).

- 1- **Tesisin servis dışı kalması:** Korozyon sonucu meydana gelen arızanın tamiri için geçen süre içinde tesis devre dışı kalarak üretim duracaktır.
- 2- **Ürün kaybı:** Bir deponun, tankın veya boru hattının korozyon sonucu delinmesi halinde, olayın farkına varılıncaya kadar geçen süre içinde ürün kaybı söz konusu olur. Bu kayıplara korozyon kaybı olarak bakmak gerekir.
- 3- **Ürün kirlenmesi:** Çözünen korozyon ürünleri, elde edilen kimyasal madde içine karışarak onun kirlenmesine neden olur.
- 4- **Anti korozif boyalar:** Metalleri korozyondan korumak üzere kullanılan boyalara yapılan harcamalar da korozyon kaybı olarak kabul edilmelidir.
- 5- **Korozyon için alınan aşırı önlemler:** Çoğu zaman korozyon hızının ne büyüklükte olacağı başlangıçta tam olarak bilinemediği için, tasarım sırasında gereğinden kalın malzemeler veya çok pahalı malzemelerin kullanılması yoluna gidilmektedir. Bu harcamalar görünmez korozyon kaybı olarak kabul edilmelidir.

Korozyon olayı çeşitli ortamlar içinde değişik şekilde ortaya çıkar. Esas olan çözünmüş halde iyon içeren bir çözeltinin (elektrolitin) bulunmasıdır. Bu açıdan bakıldığında yalnız sulu çözeltiler değil, hava, zemin, beton gibi rutubet içeren ortamlar da korozyona neden

olabilirler. Bütün bu ortamlar içinde elektrolitik tipte korozyon olayı gerçekleşir. Atmosferde bulunan tanklar, depolar, direkler, korkuluklar, zemin içinde bulunan boru hatları, beton içinde bulunan betonarme demirleri ve deniz içindeki gemiler, iskeleler, çelik kazıklar korozyon olayı ile karşı karşıyadır. Bütün bu ortamlarda meydana gelen korozyon olayı aynı karakterde olmakla beraber, değişik ortamlarda metal yüzeyine oksijen difüzyon hızı bir birinden farklı olduğundan korozyon hızları ve etkisi de bir birinden farklıdır. Zemin cinsine göre korozyon dolayısıyla korozif ortam 6 gruba ayrılır.

- Atmosferik korozyon
- Tatlı su içinde korozyon
- Kazan besleme suları korozyonu
- Deniz suyu içinde korozyon
- Zemin içinde korozyon
- Beton içinde çeliğin korozyonu

4.1. Atmosferik Korozyon

Atmosfer içinde bırakılan metaller zamanla korozyona uğrar. Endüstride birçok metalik yapı açık atmosferde bulunur. Bunların başlıcası, köprüler, direkler, çatılar, balkonlar, korkuluklar, depolar, taşıt araçları v.b. sayılabilir. Doğrudan açık atmosferde kalmayan kapalı bölgelerde bulunan metal yapılarda da daha az olarak korozyon meydana gelir. Atmosferik korozyona etki yapan faktörler şunlardır (Speller, 1951).

- Rutubet
- Rutubet filminin elektrolitik özellikleri
- Kükürt oksitler
- Klorür
- Katı partiküller
- Sıcaklık

Endüstriyel atmosferde 16 yıl bırakılan bir çeliğin korozyon hızının zamanla değişimi Çizelge 4.1 de görülmektedir (Speller, 1951). Atmosferik korozyonu önlemek için atmosfere dayanıklı çelikler kullanılıp atmosferin kontrolü yapılabilir.

Çizelge 4.1 Endüstriyel atmosferde 16 yıl bırakılan yumuşak çeliğin korozyon hızının zamanla değişimi

Yıllar	Korozyon hızı ($\mu\text{m/yıl}$)	Toplam korozyonun bir yıla düşen payı (%)
1.ci yıl	12,50	60
2. ci yıl	1,50	8
3-4 yıllar	1,25	6
5-6 yıllar	0,625	3
9-16 yıllar	0,200	1
Toplam 16 yıl	20,6	100

4.2. Tatlı Su İçinde Korozyon

Bir tatlı suyun korozif özelliği, başta çözünmüş oksijen konsantrasyonu olmak üzere, elektriksel iletkenlik, pH , sertlik, bikarbonat ve klorür iyonları konsantrasyonuna bağlıdır. Bunlar aşağıda detaylı olarak incelenmektedir.

a) Oksijen Konsantrasyonu

İçinde çözünmüş halde oksijen bulunmayan nötral sular içinde korozyon olayı gerçekleşmez. Oksijen olmayınca katot reaksiyonu yürümez, sonuç olarak bütün korozyon olayı da gerçekleşmemiş olur. Saf su içindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi sıcaklığa bağlıdır (Speller, 1951).

Çizelge 4.2 Saf su içinde oksijen çözünürlüğü

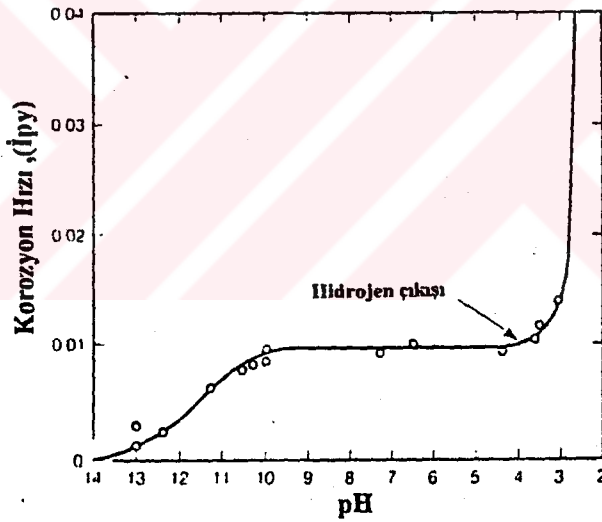
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	Çözünmüş oksijen (Mg/litre)
0	14,6
20	9,1
40	6,4
60	4,7
80	2,8
100	0,0

Kapalı sıcak su sistemlerinde oksijen konsantrasyonu çok düşüktür. Bu nedenle radyatörlerin suyunun taze su ile değiştirilmesi uygun değildir. Su içinde kalan çözünmüş

oksijeni tam olarak gidermek üzere suya sülfid veya hidrazin gibi oksijen bağlayıcılar katılır. Merkezi ısıtma sistemlerinde radyatörler ve borular çeliktir. Ancak su içinde yeterli miktarda çözünmüş oksijen bulunmadığı için etkili bir korozyon gözlenmez. Fakat oksijen bakımından zengin olan soğuk su sistemlerinde çelik borularda önemli korozyon olayı görülür. Oksijenin etkisi, su içine daldırılmış olan bütün metal yapılarda korozyon açısından en önemli faktörü oluşturur. Korozyon etkisi genellikle hemen su seviyesinin altında görülür.

b) pH ' ın etkisi

Eğer suyun pH derecesi, $\text{pH} < 4$ ise, böyle asidik karakterli sular içinde hiç oksijen olmasa bile önemli ölçüde korozyon görülür. Bu durumda katodik redüksiyon olayı hidrojen çıkışı ile gerçekleşir. Sulu çözeltiler içinde demirin korozyonu üzerine pH ' ın etkisi Şekil 4.1 'de görülmektedir (Yalçın ve Koç, 1998). Doğal sularda pH değeri genellikle 8 civarındadır. Bu pH derecesinde korozyon ürünleri hidroksit veya oksit halinde bulunur. Böylece metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturur.



Şekil 4.1 Demirin korozyonu üzerine pH 'ın etkisi

c) Kalsiyum karbonat çökmesi

Tatlı sular içindeki korozyon olayı su içinde bulunan geçici sertliğin metal yüzeyinde kalsiyum karbonat halinde çökmesi ile de yavaşlar. Oluşan kalsiyum karbonat çökeltisi, korozyon ürünleri ile birlikte metal yüzeyinde sert bir kabuk oluşturur. Kalsiyum karbonatın çökebilmesi için suyun pH değeri, saturasyon pH' sı denilen (pH_s) den

büyük olması gerekir. Eğer suyun pH değeri saturasyon (pH_s)' den daha küçük ise, bu durumda çökelti olmadığı gibi, mevcut kalsiyum karbonat çökeltisi de bikarbonat halinde çözünebilir. Suyun pH değeri ve saturasyon pH_s değerleri kullanılarak su için **Langelier İndeksi** hesaplanabilir (Shreir, 1977).

$$L = pH - pH_s \quad (4.1)$$

Eğer $L > 0$ ise, söz konusu suda $CaCO_3$ çökeltisi olacağı anlaşılır. Eğer $L < 0$ ise, suda $CaCO_3$ çökeltisi meydana gelmez. Bu tip suların korozif etki yaptığı söylenebilir.

d) Sıcaklığın etkisi

Su sıcaklığının artışı korozyon hızını artırıcı rol oynar. Sıcaklığın $10^\circ C$ artışı korozyon hızının yaklaşık iki kat artmasına neden olur. Özellikle çözelti içinde difüzyon olayı sıcaklıkla artış gösterir. Fakat bu artış $80^\circ C$ e kadar etkisini gösterdiği halde bu sıcaklıktan sonra oksijen çözünürlüğünün azalması korozyon hızının azalmasına neden olur.

4.3. Kazan Besleme Suları Korozyonu

Buhar kazanlarında besleme suyunun özellikleri kontrol edilmelidir. Buhar kazanlarından elde edilen buhar daha sonra kızgın buhar ünitesine gönderilir. Türbinden çıkan çürük buhar, bir kondensere (ısı değiştiricisi) girer. Burada soğutma suyu ile yoğunlaştırılır. Kazan besleme suyunun pH derecesi de 9 dan büyük olmalıdır. Bu amaçla kazan besleme sularında, sertlik giderme, oksijen giderme, pH kontrolü gerekir. Ayrıca inhibitör katılması da gerekir.

4.4. Deniz Suyu İçinde Korozyon

Deniz suyu, bileşiminde ortalama %3-4 oranında çözülmüş halde tuz içeren kuvvetli bir elektrolittir. Deniz suyu içinde hemen hemen bütün elementler değişik oranlarda bulunur. Bunların çoğunun korozyon üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Açık denizlerde toplam çözülmüş tuz konsantrasyonu 32-36 gram.tuz/kg deniz suyu arasında değişir. Kapalı denizlerde, tropikal bölgelerde ve kıyılardan uzaklarda tuzluluk biraz daha yüksektir. Örneğin Ege denizinin tuzluluğu %3,7 (39 g/kg), Karadeniz ve Baltık denizi gibi bol nehir

suları ile beslenen Denizlerde ise %3,1'dir. İstanbul boğazından alınan deniz suyu numunesinin analizi şöyledir:

PH	= 8.1
Rezistivite	= 30 ohm.cm
Çözünmüş toplam tuz	= 40,6 g/litre
Sodyum klorür	= 29,4 g/litre
Diğer klorürler	= 12 g/litre

Deniz suyu içinde bulunan tuzların yaklaşık %75'ini sodyum klorür oluşturur. İyon olarak da en çok klorür iyonu bulunur. Deniz suyu içinde bulunan iyonların kütsel olarak yaklaşık yarısı klorür iyonudur. Hangi iyonun hangi tuz halinde bulunduğu kesin olarak söylenemez. Bunların dışında deniz suyu içinde çözünmüş olarak çeşitli gazlar (oksijen, karbondioksit, ozon, iyot, brom) bulunur. Bunların korozyon bakımından en önemlisi oksijendir. 1 kg deniz suyu içinde bulunan başlıca elementlerin gram olarak miktarları aşağıda liste halinde verilmektedir (La Que, 1975).

<u>Elementler</u>	<u>Konsantrasyon g/kg</u>
Klorür	19,354
Sodyum	10,770
Magnezyum	1,290
Kalsiyum	0,412
Potasyum	0,400
Sülfat	2,712
Bikarbonat	0,140
Bromür	0,067
Stronsiyum	0,013
TOPLAM	35,158

Deniz suyunun tuzluluk derecesi ile klorür konsantrasyonu arasında ampirik bir bağıntı vardır. Deniz suyunun tuzluluk derecesi, (1 kg deniz suyu içerisinde gram olarak çözünmüş toplam tuz kütseli) içinde bulunan klorür konsantrasyonu ile orantılıdır. Deniz suyu klorür konsantrasyonu deneysel olarak tayin edilerek aşağıdaki bağıntı yardımı ile tuzluluk derecesi hesaplanabilir (Uhlig, 1971).

Tuzluluk derecesi (g/kg) = 1,80655 . Klorür (g/kg)

$$S = 1,80655 \times (Cl^-)$$

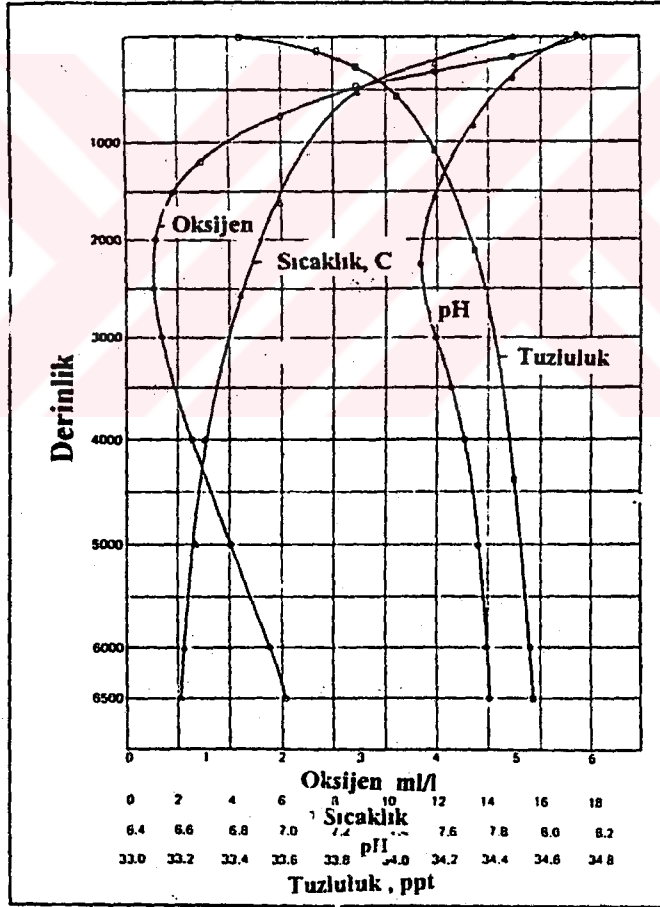
(4.2)

Burada, S : Deniz suyu içinde çözülmüş tuz konsantrasyonu (%),

Cl^- : Klorür konsantrasyonu (%) dur.

Örneğin , bileşimi yukarda verilmiş olan deniz suyunun tuzluluk derecesi bu bağıntı kullanılarak, $S = 1,80655 \times 1,9354 = \% 3,5$ bulunur.

Deniz suyunun tuzluluk derecesi derinliğe göre de değişir. Yüzeyden tabana doğru inildikçe, tuzluluk artar ilk yüz metre derinlikte tuzluluktaki artış 0,5 g/kg kadardır. Şekil 4.2'de Pasifik Okyanusunda tuzluluğun, sıcaklığın, pH'nın ve çözülmüş oksijenin derinliğe göre değişimi görülmektedir (Uhlig,1971).



Şekil 4.2 Deniz suyunda tuzluluk, sıcaklık, pH ve çözülmüş oksijen konsantrasyonunun derinliğe göre değişimi.

Çeliğin deniz suyu içindeki korozyonu tatlı su korozyonuna benzer şekilde yürür. Anodik reaksiyon sonucu metal iyonları çözeltiye geçer. Bunlar anot bölgesinde birikmeyip, suda kolay çözünebilen klorür tuzları halinde uzaklaşır. Deniz suyu pH derecesi 8 civarında olduğundan katot reaksiyonu yalnızca oksijen redüksiyonu şeklinde yürüyebilir. Bu durum deniz içindeki korozyon olaylarının esas itibarıyla metal yüzeylerine oksijen difüzyonuna bağlı kalmasına neden olur. Deniz içi çelik yapıların korozyon hızı ortalama olarak 0,10-0,125 mm/yıl verilmekle beraber, bu değer başta metal yapının karakteristikleri olmak üzere bir çok çevresel faktöre bağlı kalır. Bu faktörler, yapının sabit oluşu (çelik kazıklar), yüzmesi (dubalar), hareketli oluşu (gemiler) veya taşıyıcı olması (tanklar) halinde değişik şekilde etkiler. Deniz suyu içinde bulunan sabit yapılarda meydana gelen korozyon olayının genel karakteristikleri şöyle özetlenebilir.

- Deniz suyu içinde fazla miktarda klorür iyonu bulunması çeliğin pasifleşmesini önler. Bu nedenle deniz içinde bulunan çelik yüzeylerde koruyucu oksit tabakası oluşmaz.
- Deniz suyunun elektriksel iletkenliği çok yüksektir. Bu durum çelik yüzeyinde galvanik etki ve konsantrasyon farkı nedeniyle oluşan korozyon hücrelerinin daha etkili olmasına neden olur. Deniz içindeki çeliğin korozyon hızı zemin içindekinden on defa daha fazladır.
- Deniz suyu içinde yaşayan bitki ve hayvanlar metal yüzeyine yapışarak doğal bir kabuk oluşturur. Bu kabuk korozyon ürünleri ve deniz suyu içinde bulunan karbonat ve silikatların etkisi ile heterojen bir yapı gösterir.

4.4.1. Deniz içi korozyonuna etki yapan faktörler

a) pH 'ın etkisi

Deniz suyunun pH derecesi normal koşullarda 8,1 ile 8,3 arasında değişir. Bu değer yüzeye yakın olan bölgelerde daha yüksektir. pH değeri deniz suyu içinde bulunan bikarbonat iyonları ile, atmosferde bulunan karbondioksitin dengesinden oluşur. Deniz suyu içinde çözülmüş olarak bulunan karbondioksit deniz içinde yaşayan bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Böylece yüzeye yakın bölgede güneş ışınlarının etkisi ile yürüten bu olay karbondioksitin azalmasına ve pH derecesinin artmasına neden olur. Derine doğru inildikçe pH derecesinde azalma görülür. Bu durum, çürüten organik maddelerin çıkardığı karbondioksit ve hidrojen sülfürden ileri gelir. Yüzeyde 8,2 olan pH

derecesi yaklaşık 100 m derinlikte 7,6 ya düşmektedir. pH derecesinin derinliğe göre değişimi Şekil 4.2’de görülmektedir (Çizmecioğlu, 1997).

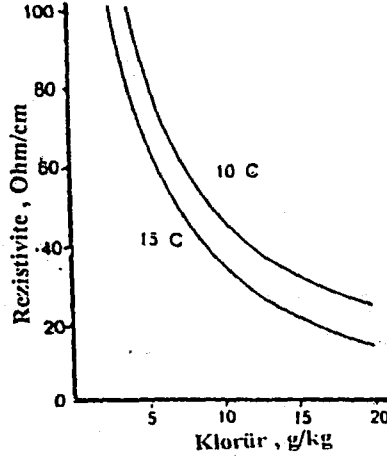
Deniz suyunun pH derecesinin yüksek olması deniz suyu içinde katodik reaksiyonun hidrojen çıkışı ile değil, çözünmüş oksijen redüksiyonu şeklinde yürütmesine neden olur. Yani deniz suyunun pH derecesinin korozyon üzerinde doğrudan bir etkisi görülmez. Fakat, $\text{pH} > 8$ olduğu için oluşan korozyon ürünleri hidroliz olarak metal yüzeyinde çökebilir. Diğer taraftan katot reaksiyonu sonucu hidroksil iyonları oluşarak katot bölgesinde pH derecesinin daha da yükselmesine neden olur. Bu durumda deniz suyu içinde bulunan Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi katyonlar karbonat ve hidroksit halinde çökerek metal yüzeyinde bir kabuk oluşturur. Bu kabuk deniz suyu içinde yürüten korozyonun hızının büyük ölçüde azalmasına neden olur. Çelik yüzeyinde oluşan kabuğun kimyasal bileşimi yaklaşık olarak şöyledir (La Que, 1975).

<u>Kabuk içinde bulunan bileşenler</u>	<u>Kütleli (%)</u>
Kalsiyum karbonat	57
Demir oksit	19
Kalsiyum sülfat	3
Mağnezyum hidroksit	3
Silikatlar	8
Organik bileşikler	5
Kristal suyu	5

Katodik koruma uygulanan çelik yüzeylerde oluşan kabuğun hem kimyasal bileşimi, hem de fiziksel yapısı uygulanan dış akım yoğunluğuna bağlıdır. Yüksek akım yoğunluğunda kabuk oluşumu hızlanır ve kabuğun bileşimindeki magnezyum oranı artar. Bu durumda kabuk daha yumuşak süngerimsi bir yapı gösterir. Metal yüzeyinde oluşan kabuğun korozyon üzerinde önemli etkileri görülür. Birincisi, kabuklaşma nedeniyle metal yüzeyine oksijen difüzyonu büyük ölçülerde azalır. Oksijen azaldığında korozyon hızı azalmakla birlikte bu bölgeler metalin anodu olarak rol oynayacaktır. İkincisi, kabuk elektriksel direnci artırır. Bu olay katodik koruma uygulamasından sonra akım ihtiyacının zamanla azalmasına ve bir kaç ay içinde yaklaşık üçte birine düşmesine neden olur. Üçüncüsü canlılar öldüğünde çürüme meydana gelir. Bitki organizmalarının çürümesi sonucu asit, hayvan organizmalarının çürümesi sonucu da hidrojen sülfür ve azot bileşikleri meydana gelir. O bölgede korozyon hızı artar.

b) Çözünmüş tuzların etkisi

Çözünmüş tuzlar korozyon üzerine iki şekilde etki yapar. Birincisi, çözünmüş tuz konsantrasyonu arttıkça elektriksel iletkenlikte de artış olur. İletkenliğin konsantrasyon ve sıcaklığa bağlılığı Şekil 4.3 ve Çizelge 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3 Deniz suyu rezistivitesinin içerdiği klorür iyonu konsantrasyonuna göre değişimi

Çizelge 4.3 Deniz suyunun iletkenliğinin tuzluluk ve sıcaklığa göre değişimi (La Que, 1975)

Deniz suyunun iletkenliği ($\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)						
% Cl^-	0 °C	5 °C	10°C	15°C	20° C	25° C
0,1	0,001839	0,002134	0,002439	0,002763	0,003091	0,003431
0,5	0,008327	0,009653	0,011019	0,012459	0,013939	0,015471
1,0	0,015852	0,018329	0,020906	0,023584	0,026367	0,029242
1,1	0,017304	0,020000	0,022804	0,025722	0,028749	0,031879
1,2	0,018741	0,021655	0,024684	0,027841	0,031109	0,034489
1,3	0,020167	0,023297	0,026548	0,029940	0,033447	0,037055
1,4	0,021585	0,024929	0,028397	0,032024	0,035765	0,039638
1,5	0,022993	0,026548	0,030231	0,034090	0,038065	0,042180
1,6	0,024393	0,028156	0,032050	0,036138	0,040345	0,044701
1,7	0,025783	0,029753	0,033855	0,038168	0,042606	0,047201
1,8	0,027162	0,031336	0,035644	0,040176	0,044844	0,049677
1,9	0,028530	0,032903	0,037415	0,042158	0,047058	0,052127
2,0	0,029885	0,034454	0,039167	0,044144	0,049248	0,054551

Deniz suyu iletkenliğinin çok yüksek oluşu yalnız mikro korozyon hücrelerinin değil , makro düzeyde galvanik hücrelerin de etkili olmasını sağlar. Bu durum özellikle deniz suyu içindeki paslanmaz çeliklerde kendini gösterir. Elektrolit içinde omik direncin azalması ,çok geniş bir katot bölgesinin çok dar bir anodik bölge üzerine etkisi ile çukur tipi korozyon olaylarının yürütmesine neden olur.

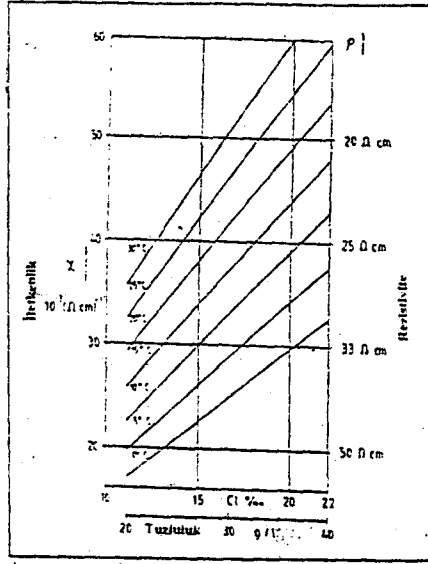
İkinci olarak,deniz suyu içinde klorür konsantrasyonunun yüksek oluşu, bu iyonun metal yüzeyinde oluşan pasif tabakayı kolayca bozmasına neden olur.Bu etki nedeniyle alüminyum ve paslanmaz çelik gibi pasifleşme özelliği olan metaller deniz suyu içinde korozyona dayanıksızdır. Deniz suyu içinde çözünmüş olarak bulunan kalsiyum ve magnezyum tuzları metal yüzeyi üzerinde zamanla çökebilir. Çökelme katodik reaksiyon sonucu oluşan hidroksil iyonlarının etkisiyle çabuklaşır. Özellikle katodik koruma uygulanması halinde kabuklaşma hızında büyük ölçüde artış görülür.

c) Rezistivitenin etkisi

Deniz suyunun korozyon açısından en önemli özelliği rezistivitesinin çok düşük oluşudur. Deniz suyunun rezistivitesi tuzluluk derecesine bağlı olarak 16-40 Ohm.cm arasında değişir. Rezistivite ve dolayısıyla iletkenlik su içinde çözünmüş olan tuzların cinsine ve miktarına bağlıdır. Tuz konsantrasyonu arttıkça iletkenlik artar, rezistivite azalır. Deniz suyunun iletkenliği tatlı sulara göre yaklaşık 250 kat daha fazladır. Diğer taraftan sıcaklık da iletkenlik üzerine etki yapar. Sıcaklığın artışı suyun elektriksel iletkenliğini artırıcı rol oynar. Deniz suyunda çözünmüş toplam tuz konsantrasyonu bilinirse iletkenliği bulunabilir. Bu amaçla tablolar ve grafikler hazırlanmıştır. (Çizelge 4.3, Şekil 4.3) Yukarda açıklandığı üzere deniz suyunda toplam çözünmüş tuz konsantrasyonu ile klorür konsantrasyonu arasında bağıntı vardır. Bu nedenle tuz konsantrasyonu yerine klorür konsantrasyonu kullanılabilir. Deniz suyu iletkenliğinin tuzluluğa (klorür yüzdesine) ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 4.4'de verilmektedir (Shreir, 1977).

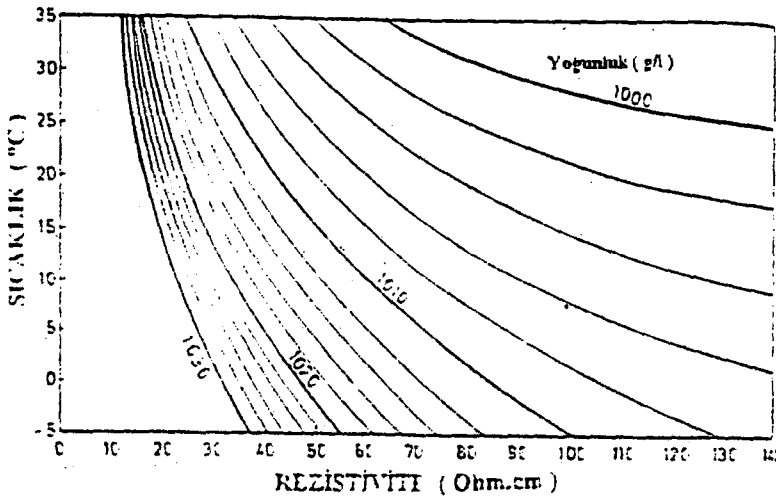
Deniz suyunun klorür konsantrasyonu bilinirse, bu çizelge ve grafikler yardımı ile deniz suyunun söz konusu sıcaklıktaki iletkenliği bulunabilir. Örneğin tuzluluk derecesi 36 g / kg olan (klorür derecesi 20 g/kg) bir deniz suyunun 20 °C deki öz iletkenliği tablodan $\kappa = 49248 \mu\text{mho/cm}$ olarak okunur. O halde rezistivite, öz iletkenlik değerinin tersi alınarak $\rho = 1 / 49248 = 20,3 \cdot 10^{-6} \mu\text{Ohm.cm}$ veya 20,3 Ohm.cm olarak bulunur. Tuzluluk derecesi

36 g/kg ($\text{Cl}^- = \% 20$) olan söz konusu olan deniz suyunun iletkenliği ve rezistivitesi Şekil 4.4 yardımı ile de bulunabilir. Grafikten $\kappa = 49 \times 10^{-3} \text{ Ohm/cm}$ ve $\rho = 21 \text{ Ohm.cm}$ okunur (Shreir, 1977).



Şekil 4.4 Deniz suyu rezistivitesi ve iletkenliğinin tuzluluğa ve sıcaklığa göre değişimi.
(Öz iletkenlik, mho/cm = 1 / Rezistivite, Ohm.cm)

Deniz suyu rezistivitesi yoğunluğa bağlı olarak da bulunabilir. Yoğunluğun ölçölmesi tuz konsantrasyonunu tayin etmekten daha kolay olduğu için pratikte çoğu zaman bu yöntem tercih edilir. Yoğunluk sıcaklıkla değiştiği için deniz suyu yoğunluğunun hangi sıcaklıkta ölçölmiş olduğunun da belirtilmesi gerekir. Deniz suyu rezistivitesinin yoğunluğa bağlı olarak değişimi Şekil 4.5'de görölmektedir.



Şekil 4.5 Deniz suyu rezistivitesinin yoğunluk ve sıcaklığa bağlılığı

Örneğin, yoğunluğu 1023 g/l olan bir deniz suyunun 20°C deki rezistivitesi Şekil 4.5 den $\rho = 21 \text{ Ohm.cm}$ olarak okunur.

d) Çözünmüş oksijenin etkisi

Deniz suyu içinde bulunan çeliğin korozyon hızı doğrudan çözünmüş oksijen konsantrasyonuna bağlıdır. Deniz suyu içinde yürüten korozyon olaylarında katot reaksiyonu yalnızca çözünmüş oksijen redüksiyonu ile yürür. Yani korozyon hızı metal yüzeyine oksijen difüzyon hızının kontrolü altındadır. Bu nedenle deniz suyu içindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu, korozyon açısından büyük önem taşır. Oksijenin kaynağı atmosferdir. Bu nedenle yüzeyde maksimum olan oksijen konsantrasyonu derinlere gidildikçe azalır. Deniz suyu içinde oksijenin çözünürlük derecesi çözünmüş tuz konsantrasyonuna ve suyun sıcaklığına da bağlıdır (Çizelge 4.4) (Shreir, 1977).

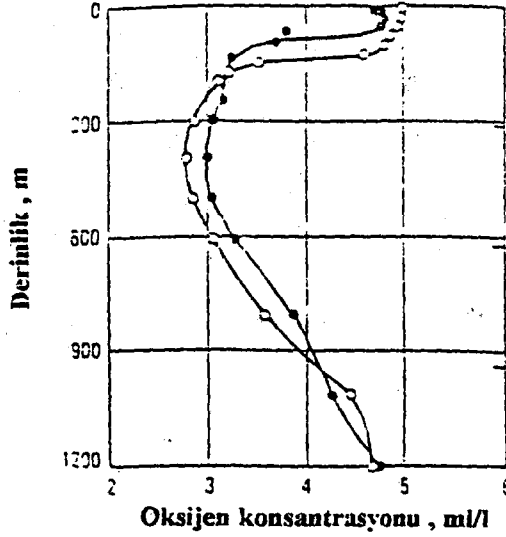
Çizelge 4.4 Oksijenin çözünürlüğünün sıcaklık ve tuzluluğa göre değişimi

Sıcaklık, °C	Oksijenin sudaki çözünürlüğü, ml / l					
% Tuz	0 g/kg	8 g/kg	16 g/kg	24 g/kg	31 g/kg	36 g/kg
0	10,22	9,70	9,19	8,70	8,27	7,99
5	8,93	8,49	8,05	7,64	7,28	7,04
10	7,89	7,52	7,14	6,79	6,48	6,28
15	7,05	6,72	6,40	6,10	5,83	5,65
20	6,35	6,07	5,79	5,52	5,29	5,14
25	5,77	5,52	5,27	5,04	4,84	4,70
30	5,28	5,06	4,84	4,63	4,45	4,33

Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere, deniz suyu içinde çözünmüş oksijen konsantrasyonu sıcaklığın ve tuzluluğun artışı ile azalmaktadır. Yukarıda bahsedildiği gibi deniz suyu içinde çözünmüş oksijen konsantrasyonu derinliğe de bağlıdır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu yüzeyden tabana doğru gittikçe azalarak, ilk 300 m derinlikte yaklaşık yarı değerine kadar düşer (Şekil 4.6).

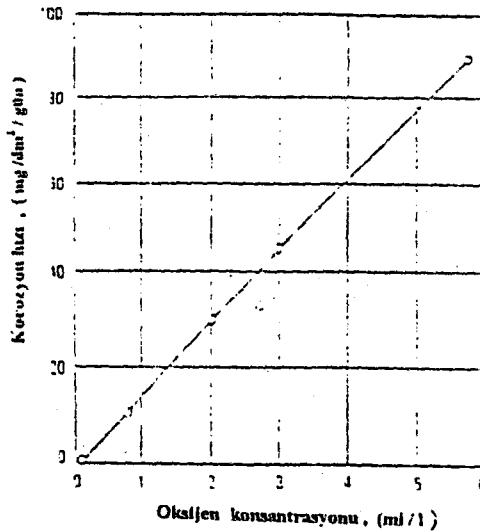
Yüzeyde maksimum olan çözünmüş oksijen konsantrasyonunun derine doğru gidildikçe azalması şu nedenlerden ileri gelir. Atmosfere yakın olan bölgede su içinde çözünmüş oksijen ile hava oksijeni denge halindedir. Bu nedenle yüzeyde oksijen konsantrasyonu

maksimumdur. Su içinde çözülmüş oksijenin difüzyon yoluyla derinlere taşınması son derece yavaştır. Diğer taraftan güneş ışınlarının etkili olduğu üst bölgede fotosentez olayları ile oksijen üretilir. Daha derin bölgelerde ise artık çürüme olayları başlar ve çözülmüş oksijen gittikçe azalır (La Que, 1975).



Şekil 4.6 Çözülmüş oksijen konsantrasyonunun derinliğe göre değişimi
(o)Pasifik okyanusu (*) Atlantik okyanusu

Daha önce belirtildiği üzere deniz içi korozyonu metal yüzeyine olan oksijen difüzyonunun kontrolü altındadır. Katot bölgesindeki oksijen konsantrasyonu azaldıkça korozyon hızında da azalma olur. Hatta metal yüzeyine oksijen taşınması tam olarak önlendiği zaman korozyon olayı da durur. Deniz içi korozyonunda çözülmüş oksijen konsantrasyonu ile korozyon hızı arasında lineer bir bağıntı vardır (Şekil 4.7) (La Que, 1975).



Şekil 4.7 Çözülmüş oksijen konsantrasyonu ile çeliğin korozyon hızı arasındaki bağıntı

Bu durum deniz içi sabit yapılarında korozyon hızının yüzeye yakın olan bölgelerde daha yüksek tabanda ise, daha düşük olmasına neden olur. Deniz dibinde korozyon hızı son derece düşüktür. Deniz içine çakılmış bir çelik kazığın korozyon hızı, yüzeyden itibaren derine gidildikçe oksijen konsantrasyonunun azalması ve kabuklaşma olayı nedeniyle çeşitli bölgelerde büyük farklılıklar gösterir.

e) Sıcaklığı etkisi

Sıcaklık korozyon reaksiyonlarının hızını artırıcı olarak rol oynar. Sıcak denizlerde korozyon hızının soğuk denizlere göre daha fazla olması gerekir. Ancak sıcaklığın oksijenin su içinde çözünürlüğü ve mikroorganizmaların gelişme hızı üzerinde de etkili olduğu görülür. Bu olaylar korozyon hızı üzerine dolaylı etki yapar. Sıcaklığın artışı oksijenin sudaki çözünürlüğünü azaltır ve dolayısı ile korozyon hızının da azalmasına neden olur. Diğer taraftan sıcaklık arttıkça deniz içinde yaşayan canlıların çeşidi ve gelişme hızı artar. Böylece metal yüzeyinde fouling oluşumu ile koruyucu bir kabuklaşma meydana gelir. Kabuklaşma olayı metal yüzeyine olan oksijen difüzyonunu güçleştirir. Bu çelişkili etkiler, sıcaklığın korozyon hızı üzerine etkisi konusunda genel bir hüküm verilmesini güçleştirir. Coğrafi bölgelere ve mevsimlere göre deniz suyunun sıcaklığı 5-25°C arasında değişir. Mevsimsel değişimler belli bir derinliğe kadar etkili olur. Yaklaşık 50 m derinlikten sonra meteorolojik olayların artık etkili olmadığı ve deniz suyu sıcaklığının artık 4 -5 °C de sabit kaldığı görülür. Sıcaklığın derinliğe göre değişimi Şekil 4.2' de görülmektedir (Uhlig, 1971).

f) Fouling etkisi

Deniz suyu içinde çok sayıda bitki ve hayvan yaşar. Bu canlılardan bazıları metal yüzeyinde oluşan kabuğa yapışır. Bu olay korozyon açısından iki farklı etki yaratır. Metal yüzeyini kaplayan organizmalar yüzeyde oksijen difüzyonunun azalmasına neden olurlar. Böylece korozyon hızında azalma görülür. Fakat zamanla ölen canlılar çürüyerek yüzeyde asidik bir ortam oluşmasına ve korozyonun artmasına neden olurlar. Deniz içi canlıların diğer bir zararlı etkisi de metal yüzeyi üzerine yapılmış olan boyalarda görülür. Deniz canlıları boya tabakasına yapışarak boyanın kısa sürede delinmesine ve parçalanmasına neden olurlar. Bu durum zehirli boya kullanılarak önlenabilir.

g) Hızın etkisi

Deniz suyunun hareket hızı da korozyon hızı üzerine etkili olur. Bunun başlıca nedeni metal yüzeyine olan oksijen difüzyon hızının artmasıdır. Hareket halinde kabuklaşma olayı da gerçekleşemez ve bu durum metalin polarize olmasını önler. Suyun hareket hızı ile korozyon hızı artar.

h) Kirliliğin etkisi

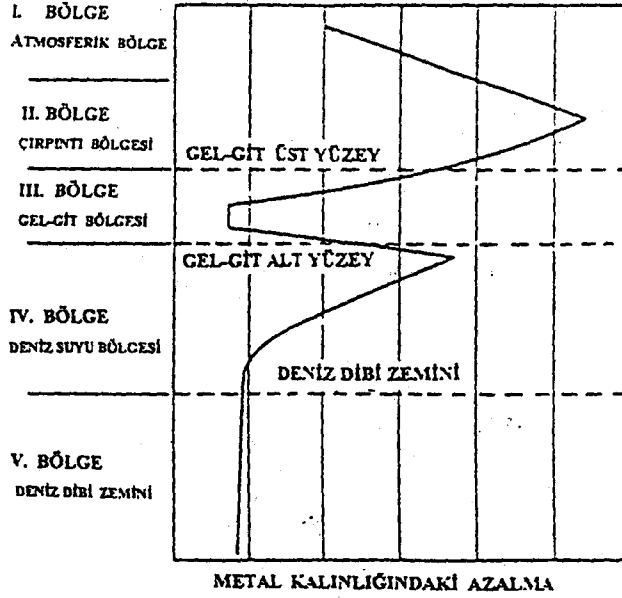
Deniz suyunun kirlenmesi sonucu tuzluluk derecesinde önemli bir artış görülmez. Deniz suyunun kirlenmesi endüstriyel atıklar nedeniyle ağır metallerle, evsel atıklar ve tarımda kullanılan gübreler nedeniyle nitrat ve fosfat artışı şeklinde oluşur. Diğer taraftan deniz suyu içinde bulunan organik madde miktarında artış meydana gelir. Nitrat ve fosfat ötrifikasyon nedeniyle, organik maddeler de çürüme sonucu deniz suyu içindeki çözülmüş oksijenin azalmasına neden olur. Çürüme olayları bir yandan oksijen harcarken diğer taraftan karbon dioksit ve hidrojen sülfür oluşturur. Böylece deniz suyu pH derecesinde azalma yani asidik yönde artış olur. Kirlenmiş deniz suyunda oksijen konsantrasyonundaki azalmanın korozyon hızında bir azalmaya neden olması gerekirken gerçekte bu olmaz. Bunun nedeni oksijensiz ortamlarda, özellikle paslanmaz çeliklerde mikrobiyolojik korozyonun daha şiddetli olarak ortaya çıkmasıdır. Deniz diplerinde oluşan anaerobik çürümeler sonucu çok yüksek derecelere ulaşan hidrojen sülfür oluşur. Bu ortam mikrobiyolojik korozyon için son derece uygundur.

4.4.2. Deniz içindeki yapılarda korozyon hızı

Deniz içine iskele veya yol yapımı nedeniyle çelik kazıklar çakılır. Bu kazıklar üzerinde, atmosferden deniz dibi zeminine kadar inildiğinde korozyon açısından beş farklı bölge bulunur (Şekil 4.8) (Yalçın ve Koç, 1998).

I. Bölge: Deniz suyunun ıslatmadığı bu bölge, denize çok yakın oluşu nedeniyle doygun rutubetli bir deniz atmosferinin etkisi altındadır. Bu nedenle korozyon hızı oldukça yüksektir.

II. Bölge : Bu bölge çırpıntı bölgesidir, dalga nedeniyle zaman zaman ıslanır ve kurur. Böylece korozyon için çok uygun bir ortam oluşur. Kazıklarda en şiddetli korozyon olayı bu bölgede oluşur.



Şekil 4.8 Deniz içine çakılmış olan bir çelik kazıkta korozyon bölgeleri

III. Bölge: Gel-git etkisi ile uzun süre su altında ve uzun süre atmosferde kalan bu bölgede de korozyon hızı yüksektir. Ancak ıslanma ve kuruma nedeniyle gel-git bölgesinin orta kısmında kabuklaşma olayı görülür. Kabuk oluşumu bu bölgede korozyon hızının azalmasına neden olur.

IV. Bölge : Sürekli olarak deniz suyu içinde kalan üst bölgede, en bol oksijen alabilen bölge olması nedeniyle korozyon hızı yine yüksektir. Bir kaç metre derine inildiğinde, çözünmüş oksijen konsantrasyonunda azalma olacağından korozyon hızı da azalır. Korozyon hızı 2-3 m derinlikten sonra artık değişmez.

V.Bölge : Deniz dibi çamuru içinde kalan bu bölgede, eğer anaerobik bir ortam söz konusu değilse korozyon hızı son derece düşüktür.

Deniz suyu içinde çeliğin korozyon hızı bekleme süresine göre değişir. İlk ay içinde korozyon hızı çok yüksektir. Zamanla korozyon hızında azalma olur. Çeliğin deniz suyu içinde 4 yıl bekletilmesi halinde yıllık ortalama korozyon hızının zamana göre değişimi Çizelge 4.5’de liste halinde verilmektedir (La Que, 1975).

Çizelge 4.5 Korozyon hızının zamana göre değişimi

Deniz suyu içinde bekleme süresi	Ortalama korozyon hızı (mm/yıl)
1 ay	0,33
2 ay	0,25
3 ay	0,19
6 ay	0,15
1 yıl	0,13
2 yıl	0,12
4 yıl	0,11

Tablodan görüldüğü üzere, deniz suyu içinde bekletilen çeliğin birinci aydaki korozyon hızı 0,33 mm/yıl dır. Korozyon hızı birinci yıl içinde şiddetle azalarak 0,13 mm/yıl değerine düşer. Dört yıl sonunda ortalama yıllık korozyon hızı 0,11 mm/yıl olur. Korozyon hızı on altıncı yılda yaklaşık 0,025 mm/yıl değerine kadar düşer. 16 yılın ortalama korozyon hızı ise 0,08 mm/yıl civarındadır. Korozyon hızında gözlenen bu azalış, çelik yüzeyinde oluşan kabuklaşmadan ileri gelir.

Metal yüzeyi üzerinde oluşan bu kabuğun, korozyona karşı metali koruyucu etkisi vardır. Bu etki metal yüzeylerine olan oksijen difüzyonunun kabuk nedeniyle engellenmiş olmasından ileri gelir. Diğer taraftan kabuğun elektriksel direnci de çok yüksektir. Bu direnç, yüzeydeki galvanik korozyon hücrelerinden geçen akımın azalmasına neden olur. Katodik koruma uygulanmış çelik yüzeylerde kabuklaşma olayları daha hızlıdır. Bu nedenle ilk günlerde yüksek olan katodik koruma akım ihtiyacı zamanla azalır. Eğer sabit bir akım uygulanacak olursa, çeliğin potansiyelinde zamanla artış görülür. Kabuklaşma süresi uygulanan dış akım yoğunluğuna bağlıdır.

4.5. Zemin İçinde Korozyon

Yeraltına konulmuş olan metallerin korozyonunda zemin elektrolit rolü oynar. Zemin boşlukları içinde az veya çok su bulunur. Bu su içinde başta klorür ve sülfat tuzları olmak üzere çeşitli iyonlar çözünmüş haldedir. Ayrıca çözünmüş veya gaz halinde oksijen de bulunur. Böyle bir elektrolit içinde korozyonun yürümesi için mutlaka iki ayrı metalin bulunması şart değildir. Metal yapısında veya elektrolitte bulunan bazı farklılıklar

nedeniyle meydana gelen potansiyel farkı, mikro veya makro korozyon hücreleri oluşturabilir. Bunun sonucu olarak, metal yüzeyinin bazı bölgeleri katot, bazı bölgeleri de anot olur. Elektron akımı metal üzerinden gerçekleşir. Birçok metal yapı zemin içinde bulunur. Bunlar zeminin korozif etkisi altında kalır. Zeminin içinde bulunan başlıca yapılar şunlardır:

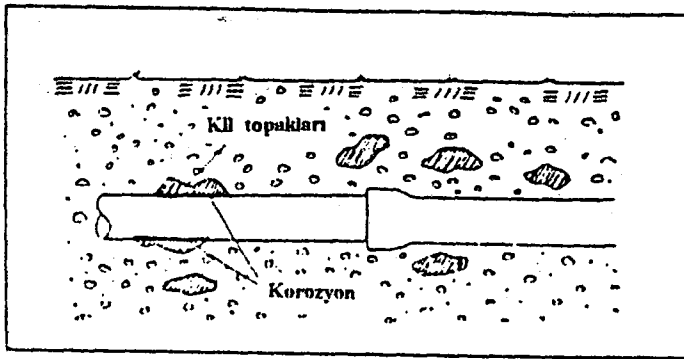
- Su isale hatları
- Doğal gaz boru hatları
- Yeraltı akaryakıt tankları
- Telefon kabloları
- Yüksek gerilim hatları direklerinin ayakları
- Çelik kazıklar

4.5.1. Zemin içinde korozyonun oluşum nedenleri

Zemin içinde bulunan bir çelik yapı çok çeşitli nedenlerle korozyona uğrayabilir. Bunlardan en önemlileri şunlardır:

1. Metal yüzeyinde yerel farklılıklar oluşması
2. Zemin cinsi veya yapısının değişmesi
3. Metal cinsi veya yapısının değişmesi
4. Farklı havalanma

- **Metal yüzeyindeki farklılıklar nedeniyle oluşan korozyon**

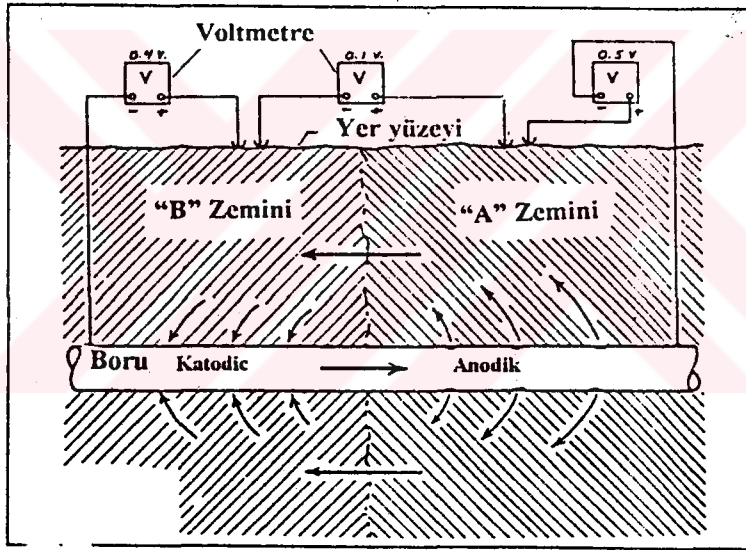


Şekil 4.9 Çelik yüzeyine yapışan kil topaklarının neden olduğu korozyon (Parker, 1995)

Korozyon hücreleri ancak bir potansiyel farkı bulunduğu zaman oluşabilir. Yeraltında bulunan bir çelik yapı yüzeyinde kaplama bozukluğu veya bir metalurjik yapıda herhangi bir fark bulunması çelik zemin potansiyelinin yer yer değişmesine neden olur. Hatta çelik yüzeyinde oluşan heterojen kabuklar da korozyon hücresine yetecek ölçüde potansiyel farkı yaratabilir. Örneğin kumlu bir zemin içinde bulunan kaplamasız bir boru yüzeyine yapışan kil topakları o bölgenin daha az oksijen almasına ve korozyona uğramasına neden olabilir (Şekil 4.9).

- **Zemin cinsi ve yapısının değişmesi ile oluşan korozyon**

Yeraltına konulan bir boru hattı veya çelik kazık kil, kum, kalker vb. çeşitli cinsten zeminler içinden geçer. Doğal olarak zemin cinsi değiştikçe çelik/zemin potansiyelinde de değişme olur. Bu durumda boru hattı veya çelik kazık boyunca makro ölçüde anot ve katot bölgeleri meydana gelebilir (Deabody, 1967).



Şekil 4.10 Farklı zeminlerin neden olduğu korozyon

Bazı halde zemin yapısı kısa mesafeler içinde de değişebilir. Çelik hat az korozif bir zeminden çok korozif bir zemine girdiği anda çelik/zemin potansiyelinde kısa mesafe içinde büyük bir değişim meydana gelir. Çelik yapının korozif karakterdeki zemin içinde kalan bölgesinde çelik/zemin potansiyeli daha negatiftir. Bu bölge anot olarak korozyona uğrar. Örneğin Şekil 4.10'daki boru hattında boru /zemin potansiyeli (A) zemini içinde - 0,5 Volt, (B) zemini içinde -0,40 Volt olarak ölçülmüştür. Bu durumda (A) zemini içinde kalan boru parçası anot olarak korozyona uğrayacak ve boru üzerinde katotdan anoda

doğru bir akım akacaktır. Yalnız zemin cinsinin değil, zemin rezistivitesinin değişmesi halinde de boru hattında potansiyel farkı doğabilir. Boru hattı kısa bir bölgede yeraltı suyu tablasının yüksek olduğu bir zemin içinden geçiyorsa, boru hattının bu bölgesi anot olarak korozyona uğrayabilir.

- **Farklı metallerin bağlantısından oluşan korozyon**

Aynı elektrolit içinde bulunan farklı iki metalin bağlantısı galvanik bir hücre yaratacağından korozyon açısından son derece tehlikelidir. Bu nedenle pik, çelik ve paslanmaz çelikler hiçbir zaman birbirine bağlanarak kullanılmamalıdır. Hatta farklı cinsten kaplama yapılmış borularda bile etkili bir korozyon olayı görülebilir. Pratikte sık rastlanan bir olay, tamir sırasında yeni takılan çelik ile eski yapının arasında meydana gelen korozyondur. Burada daha negatif potansiyelli yeni çelik anot olarak korozyona uğrar.

- **Farklı havalandırmadan ileri gelen korozyon**

Daha önce açıklanmış olduğu gibi zeminler heterojen yapıdadır. Bu nedenle zemin içinde bulunan bir çelik yapının her bölgesi aynı derecede hava alamaz. Zeminin granülometrik yapısı, yoğunluğu ve rutubet derecesine bağlı olarak çelik yapının bazı bölgeleri az, bazı bölgeleri de çok oksijen alabilir. Bu farklı havalandırma çelik yapı yüzeyinde yer yer potansiyel farkı doğmasına ve korozyon hücrelerinin oluşmasına neden olur. Farklı havalandırma nedeniyle oluşan korozyon olayına tipik bir örnek, yol geçişlerinde çelik yapının kaplama altında kalan bölgesi ile, kenarlarda daha fazla oksijen alabilen bölgeleri arasında meydana gelen korozyon olayıdır. Farklı havalandırma nedeniyle oluşan korozyon olayına diğer bir örnek de, yeraltına hendek içine konulan çelik yapıların alt kısımlarında oluşan korozyondur. Bunun nedeni, montaj sırasında çelik yapı üst kısmına yapılan dolgu ile hendek kenarlarında bulunan bozulmamış haldeki doğal zeminin oksijen geçirgenliği arasındaki farktır. Bu durumda çelik yapının üst kısımları bol oksijen alırken alt kısımlar çok az oksijen alabilir. Taban bölgesi anot olarak korozyona uğrar. Katodik koruma uygulanmamış çelik yapılarda delinmelerin genellikle taban bölgesinde meydana gelmiş olması, borunun atmosfere yakın olan üst bölgesi ile zemine oturmuş olduğu alt bölgesi arasında oluşan oksijen konsantrasyon pili ile açıklanmaktadır.

4.5.2. Zemin korozyonuna etki eden faktörler

Yeraltında korozyon elektrokimyasal hücreler yoluyla yürür. Toprak rutubeti elektrolit rolü oynar. Yeraltındaki elektrot reaksiyonları şöyledir:



Oluşan korozyon ürünleri metal yüzeyi yakınında yeniden kimyasal reaksiyona girerek metal hidroksitleri oluştururlar. Eğer anot ve katot bölgeleri birbirine çok yakın ise (mikro hücreler) ve toprak pH derecesi 5 den büyük ise, korozyon ürünleri çelik yüzey üzerinde pas şeklinde toplanır. Bu durumda korozyon hızı zamanla gittikçe azalır. Bazı halde özellikle boru hatlarında anot ve katot bölgeleri birbirinden çok uzakta bulunur. Bu durumda anotta oluşan Me^{n+} iyonları katoda doğru, katotda oluşan OH^- iyonları da anoda doğru göç eder. Pas oluşumu anot ve katot arasında bir yerde toplanır. Yani oluşan çökelti metal yüzeyini kapatarak metali koruyucu özellik gösteremez. Böyle durumlarda anot bölgesi kısa sürede delinir. Katot bölgesinde ise metal yüzeyi temiz ve parlak halde kalır. Eğer katot bölgesi yüzey alanı anoda göre daha büyük ise, anodik akım yoğunluğu çok yükselir ve şiddetli bir çukur tipi korozyon olayı gözlenir. Zemin korozyonuna etki yapan en önemli faktörler şunlardır:

- Toprak yapısı ve rutubeti
- Oksijen konsantrasyonu
- Redoks potansiyeli
- pH değeri
- Zemin rezistivitesi
- Mikro organizmalar

a) Toprak yapısı ve rutubeti

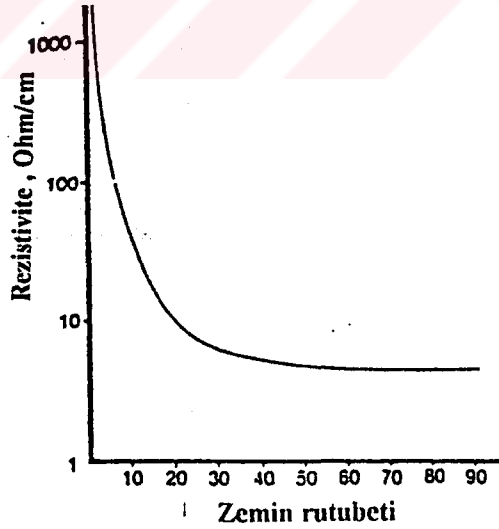
Toprak, kayaların parçalanması ile oluşan yumuşak yapılı bir birikintidir. İçinde hayvan ve bitkilerin çürüyerek bozulmasından ileri gelen çeşitli organik bileşikler de bulunur. Toprak içinde katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç faz bulunur.

Katı fazı : Kil, kum, çakıl gibi inorganik maddeler veya organik bitkisel artıklardan oluşur.

Sıvı fazı : Toprak içinde tanecikler arasında ve boşluklarda su bulunur. Bu su çözülmüş halde çeşitli tuzları ve oksijeni içerir.

Gaz fazı : Toprak içinde bulunan gözenekler ve çatlaklar hava ile dolu haldedir. Organik bileşiklerin çözünmesi sonucu oluşan karbondioksit de boşluklar içinde kalır.

Toprak heterojen bir yapı gösterir. Özellikle derine doğru değişimi daha fazladır. Mevsimlere bağlı olarak fiziksel ve kimyasal yapısı değişir. Bütün bu değişim yeraltına konulan metal yapı üzerinde etki yapar. Elektroliti oluşturması nedeni ile yeraltı korozyonunun yürümesi için toprağın içinde suyun mutlaka bulunması gerekir. Zemin içinde belli bir derinlikte yeraltı suyu tablası bulunur. Bu suyun derinliği mevsimlere göre değişir. Bazı halde toprak, yeryüzüne kadar su ile doymuş hale gelebilir. Yeraltı suyunun düzeyi korozyon açısından büyük önem taşır. Kum ve çakıllı zeminlerde suyun direne olması çok kolaydır. Killi zeminlerde boşluklara dolan su uzun süre toprağın rutubetli kalmasına neden olur. Zemin rutubeti arttıkça zeminin rezistivitesi azalır. Bu azalış yaklaşık olarak %20-30 rutubete kadar devam eder. Daha sonra zemin rezistivitesi artık değişmez. Zemin rezistivitesinin rutubete göre değişimi Şekil 4.11 da görülmektedir (Morgan, 1985).



Şekil 4.11 Zemin rezistivitesinin rutubet yüzdesine göre değişimi

b) Oksijen

Oksijen zemin içinde yürüyen katodik reaksiyon için gereklidir. Bu nedenle su içinde çözülmüş oksijenin bulunması da korozyon için mutlaka gerekli olan bir koşuldur. Zemin içine oksijen havadan gelir. Yeraltı suyu da çözülmüş halde oksijeni taşır. Zemin içinde oksijen taşınması hızı ve zeminin hava alabilme derecesi zemin cinsi ve yapısına bağlıdır. Kumlu topraklar içine killi topraklara göre oksijen taşınması daha kolay olur. Buna benzer olarak dolgu topraklarda oksijen difüzyonu hızı doğal yapıda olanlara göre daha fazladır. Boru hatları değişik cins ve yapıda zemin içinden geçerler. Bu zeminler içinde oksijen difüzyon hızı birbirinden farklıdır. Bu farklı havalanma durumu boru hattında oksijen konsantrasyon hücreleri oluşmasına neden olur. Oksijeni az alabilen bölgeler anot olur. Bu nedenle, kumlu bölgeden killi bölgeye geçişin hemen yakınında killi bölge içinde şiddetli korozyon olayı meydana gelir.

Zeminin bazı bölgelerinin farklı havalanması yerel korozyon olaylarına da neden olabilir. Örneğin bir boru hattı üzerinde bir kil parçası boru yüzeyine yapıştırsa, bu toprak altında kalan metal yüzeyi çevresine göre daha az oksijen alabilir. Bunun sonucu olarak kil topağı altında korozyon olayı başlar. Eğer boru hattı çevresi değişik yapıda topraklar ile doldurulmuş ise, boru hattı üzerinde yer yer anodik ve katodik bölgeler oluşabilir.

Oksijen konsantrasyon hücrelerine tipik bir başka örnek de, yeraltı suyu tablasının başladığı bölgede görülür. Su tablasının üst bölgeleri atmosferden bol oksijen alabilir. Alt kısımlarda ise daha az oksijen bulunur. Daha az oksijen alabilen bölgeler anot olur. Bu nedenle su tablası seviyesinin hemen altında anodik bölge oluşur. En şiddetli korozyon olayı bu bölgede görülür. Su tablası mevsimlere göre değiştiğinden korozyon olayı geniş bir bölgede etkili olur.

c) Redoks potansiyeli

Rutubetli zemin içinde bulunan oksijen konsantrasyonu hakkında redoks potansiyeli değeri ile fikir edinilebilir. Oksijen konsantrasyonu ne kadar yüksek ise redoks potansiyeli de o kadar yüksektir. Aksine olarak düşük oksijen içeren bölgelerde redoks potansiyeli de çok düşüktür. Bu nedenle redoks potansiyeli değerleri zeminlerin koroziflik derecesi

hakkında iyi bir fikir verir. Bu konuda pratikte Çizelge 4.6'da verilen sınıflandırma kullanılmaktadır (Morgan, 1985).

Çizelge 4.6 Redoks potansiyeli değerlerine göre zeminlerin sınıflandırılması

Redoks potansiyeli (mV)	Zeminin korozif özelliği
< 100	Şiddetli korozif
100 – 200	Korozif
200 – 400	Orta korozif
400<	Az korozif

Zeminlerin redoks potansiyeli pilatin elektrot ile ölçülür. Pilatin elektrot söz konusu doğal zemin içine daldırıldıktan sonra, bir başka referans elektrot ile aradaki potansiyel farkı ölçülür (E_p). Ayrıca bir pH metre ile aynı noktada zeminin pH derecesi de ölçülür. Bu iki değer kullanılarak redoks potansiyeli aşağıdaki bağıntı ile hesap edilir.

$$E_{\text{redoks}} = E_p + E_{\text{ref}} + 60 (pH - 7) \quad (4.4)$$

Burada, E_{redoks} : Zemin redoks potansiyeli (mV)

E_p : Pilatin elektrodun ölçülen potansiyeli (mV)

E_{ref} : Kullanılan referans elektrodun hidrojen elektroduna göre potansiyeli (mV) (Doygun Cu/CuSO₄ için 316 mV) dır.

d) pH

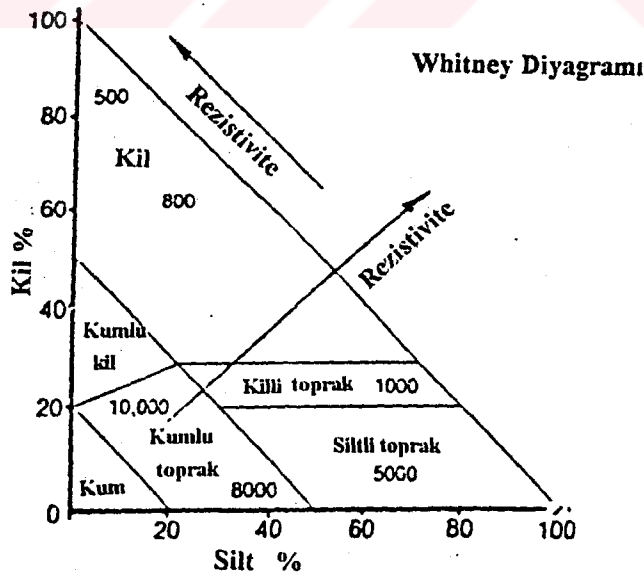
pH zeminin asitlik derecesi hakkında fikir verir. $pH < 5$ (Organik çürümelerin olduğu topraklarda pH düşüktür) ise zemin asidiktir ve korozyon ürünleri çelik yüzeyinde çökerek koruyucu özellik görevini yerine getiremez. Asidik karakterde zeminler içinde korozyon hızı çok yüksektir. Çünkü asidik ortamlarda katodik reaksiyon hidrojen çıkışı şeklinde gerçekleşir. $pH > 8$ olması halinde de zeminin alkali karakterde olduğu kabul edilir. Nötrü ve alkali zeminlerde ise, korozyon hızı katot bölgesine oksijen difüzyonu kontrolü altındadır. Kalkerli zeminlerde genellikle $pH > 8$ olur. Bu tip zeminler içinde çözünmüş halde Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi toprak alkali metalleri bulunur. Bunlar korozyon olayına doğrudan etki yapmazlar. Ancak metal yüzeyinde çökerek metali korozyondan

koruyucu bir kabuk oluşmasına neden olurlar. pH derecesinin yüksek oluşu bu çökelme olayını kolaylaştırır. Toprağın normal pH değeri 5-8 arasındadır. Bu pH aralığında korozyon hızı üzerinde pH 'ın etkisi hemen hemen yoktur. Korozyon hızı genellikle oksijen difüzyon hızının kontrolü altındadır. Toprağın pH değeri üzerine asit yağmurları da etki yapar ve pH'ın düşmesine neden olur. Böyle topraklarda çelik yüzeyinde CaCO_3 çökeleği oluşması güçleşir.

e) Rezistivite

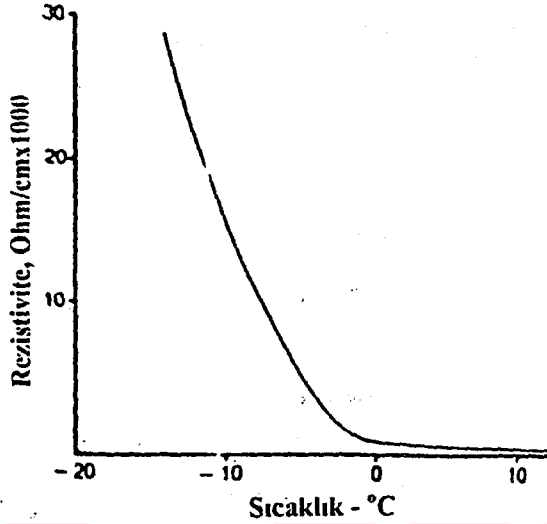
Zemin rezistivitesi, kenarları 1 cm olan bir küp içinde bulunan zeminin karşılıklı iki yüzü arasında ölçülen direnç olarak tanımlanır (ρ) ile gösterilir ve Ohm.cm birimi ile ifade edilir. Zemin rezistivitesi, zeminin koroziflik derecesi hakkında iyi bir fikir verir. Zemin içinde çözülmüş tuzların fazla olması rezistiviteyi düşürür. Rutubet ve sıcaklığın artması halinde de zemin rezistivitesinde azalma görülür. Doğal halde sıkışmış durumda olan zeminlerin rezistivitesi örselenmiş dolgu zeminlere göre daha düşük olur.

Zemin rezistivitesi doğrudan toprağın yapısı ve toprak içinde çözülmüş halde bulunan iyonların konsantrasyonuna bağlıdır. Toprak esas olarak kil ve silt karışımından oluşur. Rezistivite de toprak içinde bulunan kil ve silt yüzdelere göre değişir. Şekil 4.12'de zemin rezistivitesinin kil ve silt yüzdelere bağlı olarak değişimi görülmektedir (Morgan, 1985).



Şekil 4.12 Zemin rezistivitesinin kil, silt ve kum yüzdelere göre değişimi

Zemin rutubeti arttıkça rezistivitenin azaldığı görülür. Rezistivite sıcaklığa da bağlıdır. 0 °C ' in altında rezistivitede büyük artış olur. Zemin rezistivitesinin sıcaklığa göre değişimi Şekil 4.13'de görülmektedir.



Şekil 4.13 Zemin rezistivitesinin sıcaklığa göre değişimi

Zemin rezistivitesi düştükçe zeminin koroziflik özelliği artar. Düşük rezistivite, metal yüzeyinde oluşan korozyon hücrelerinin daha küçük potansiyel farklarında bile etkili olmasına ve korozyon akımının artmasına neden olur. Ancak bir zeminin ne derece korozif özellikte olduğunun yalnız rezistivite değeri ile belirlenmesi doğru olmaz. Rezistivite değerine ilave olarak, zemin pH derecesi ve havalanabilme durumunun da göz önüne alınması gerekir. Katodik koruma etüdlerinde boru hattının geçmiş olduğu zeminlerin rezistivite değerleri tayin edilerek bunlar katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesinde kullanılır. Zemin rezistivitesi ile zeminin koroziflik derecesi arasında bağıntı kurularak bazı pratik sınıflandırmalar yapılmıştır. Türk standardında yapılmış olan sınıflandırma Çizelge 4.7'de verilmektedir (TS 5141, 1987).

Bu sınıflandırma zeminin koroziflik derecesi hakkında kaba bir fikir vermekle beraber, yeterli ve güvenilir değildir. Çünkü rezistivite dışında kalan zemin özellikleri de korozyon hızına etki yapabilir. Nitekim, bu sınıflandırmaya göre korozif sayılmayan çok yüksek rezistiviteli zeminler içinde de bazı halde korozyon olaylarına rastlanmaktadır. Boru hatları

Çizelge 4.7 Zeminlerin rezistivite değerlerine göre sınıflandırılması

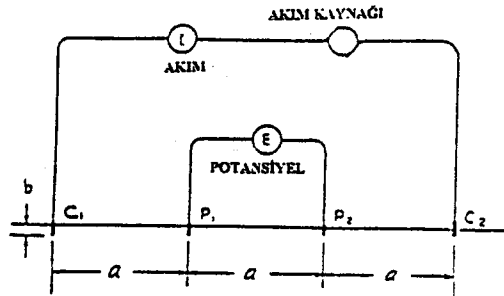
Zemin rezistivitesi ,Ohm.cm	Koroziflik derecesi
$\rho < 1000$	Çok korozif
$1000 < \rho < 3000$	Korozif
$3000 < \rho < 10000$	Orta korozif
$10000 < \rho$	Korozif değil

farklı yapıda zeminler içinden geçer. Boru hattı boyunca yer yer yüksek ve düşük rezistiviteli zeminler bulunabilir. Düşük rezistiviteli bölgeler anot, daha yüksek rezistiviteli bölgeler de katot rolü oynar.

- **Zemin rezistivitesinin ölçülmesi**

Çelik yapı bir boru hattı ise arazide boru hattının geçtiği yol boyunca 100-200 m aralıklarla zemin rezistivitesi ölçülür. Zemin cinsi ve yapısının tek düze olduğu bölgelerde rezistivite ölçümü 500-1000 m aralıklarla yapılabilir. Birbirini izleyen iki ölçümde rezistivite değerinde eğer iki kata varan bir değişim görülürse, geriye dönülüp ara noktalarda yeniden ölçüm yapılması uygun olur. Zemin rezistivitesi ölçümü, alınan zemin numuneleri üzerinde laboratuvar da yapılabilir. Ancak bu durumda zeminin doğal durumu değişeceğinden, sonuç arazideki gerçek değerinden farklı olacaktır.

Arazide belli bir derinliğe kadar olan zemin rezistiviteleri Wenner dört elektrot yöntemi ile doğrudan tayin edilebilir. Bu yöntemde zemine sabit aralıklarla dört elektrot çakılır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Wenner dört elektrot yöntemi ile zemin rezistivitesi ölçümü

a : Elektrotlar arasındaki uzaklık (cm)

b : Elektrotların zemine batma derinliği (cm)

Dıştaki elektrotlar ile zemine bir alternatif akım uygulanır. Bu akımın zemin içinde yaratmış olduğu potansiyel farkı içindeki iki elektrot arasından ölçülür (Morgan, 1985; TS 5141, 1987). Daha sonra Ohm yasası ile direnç hesaplanır. Elektrotlar arasındaki mesafe (a cm) iken, cihazın göstergesinden (R Ohm) direnç okunmuş ise, söz konusu zeminin rezistivitesi, $\rho = 2\pi a R$ Ohm.cm olarak hesaplanır. Bu amaçla arazide kullanılan cihazlarda göstergeden doğrudan direnç değeri okunur.

g) Mikroorganizmalar

Anaerobik zeminler içinde bulunan bazı bakteriler korozyona neden olurlar. Desülfovibrio desülfürikan bakterisi sülfat iyonunu sülfür haline redükler. Bu sırada demirin oksitlenmesine neden olur. Biyolojik korozyonun oluşması için aşağıdaki koşulların bir arada bulunması gerekir.

- pH değerinin 5-9 arasında olması
- Zemin içinde organik bileşiklerin bulunması
- Sıcaklığın 40 °C nin altında olması
- Redoks potansiyelin düşük olması (anaerobik ortamlar)

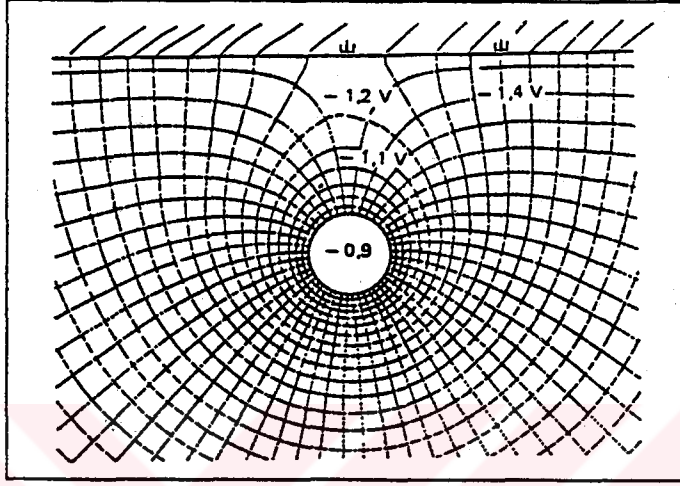
4.5.3. Zemin potansiyel ölçümleri

Korozyon kontrolünde kaçak akımların, kaplama bozukluklarının belirlenmesi ve katodik koruma uygulamalarında çelik / zemin potansiyeli ölçümleri büyük önem taşır. Laboratuvarlarda daha çok kalomel elektrot kullanıldığı halde, arazi çalışmalarında doygun bakır/bakır sülfat referans elektrot tercih edilir. Deniz suyu içinde ise, gümüş /gümüş klorür referans elektrodun kullanılması uygundur. Böylece çelik yapı ile çevre zemin arasındaki potansiyel farkı belirlenir.

• Çelik / zemin potansiyelinin ölçülmesi

Çelik/zemin potansiyeli yüksek iç dirençli bir voltmetre veya bir potansiyometre yardımı ile ölçülür. Voltmetrenin (-) ucu çelik yapıya (+) ucu da referans elektroda bağlanır. Eğer çelik yapı katodik korumalı ise, akım altında ölçülmüş olan çelik/zemin potansiyeli değeri, gerçek çelik/zemin potansiyelinden daha negatif olarak bulunur. Çünkü çelik yüzeyi ile referans elektrot arasındaki zeminin direnci nedeniyle potansiyelde negatif yönde artış

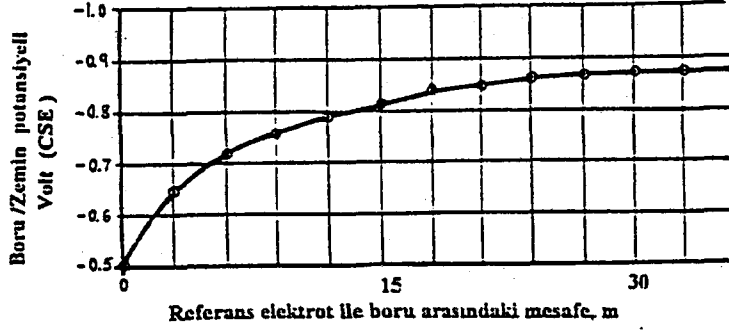
olur. Yani ölçülmüş olan potansiyel farkı içinde bu IR omik potansiyel düşüşü de vardır. Akım uygulanmamış çelik yapılarda yapılan çelik/zemin potansiyeli ölçümlerinde IR omik düşüşü söz konusu değildir. Katodik koruma uygulanmış bir çelik yapının yüzeyinde çelik/zemin potansiyeli en düşük düzeydedir. Katodik korumalı bir çelik yapı çevresinde zemin içinde mesafeye göre değişen akım ve potansiyel eğrileri meydana gelir (Şekil 4.15) (Parker, 1995).



Şekil 4.15 Bir çelik yapı (boru hattı) çevresinde oluşan akım ve potansiyel dağılımı

Çelik yapıdan uzaklaştıkça potansiyelde negatif yönde artış olur. Bu durum çelik/zemin potansiyeli ölçümlerinde referans elektrodun konulacağı yerin belirlenmesinde sorun yaratır. Doğru bir ölçüm yapabilmek için referans elektrot çelik yapıya mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Eğer referans elektrot tam olarak çelik yüzeyine konulabilmiş olsaydı çelik /zemin potansiyeli - 0,9 Volt olarak okunacaktı. Çelik yapının hemen üzerinde yer yüzünde potansiyel - 1,2 Volt olarak okunur. Referans elektrodun yüzeyde bir kaç metre uzağa konulması halinde çelik /zemin potansiyeli - 1,4 Volt okunacaktır. Bu fark yüksek rezistiviteli zeminlerde daha fazladır.

Şekil 4.16'de 3000 Ohm.cm rezistiviteli bir zemin içinde çelik yapı ile referans elektrot arasındaki mesafeye bağlı olarak çelik/zemin potansiyeli ölçümlerinin değişimi görülmektedir (Parker, 1995).



Şekil 4. 16 Kaplamasız haldeki bir boru ile referans elektrot arasındaki mesafeye bağlı olarak çelik/zemin potansiyelindeki değişim

• Statik potansiyel ve On-Off potansiyelleri

Bir çelik yapıya hiç akım uygulanmadan önce ölçülen denge potansiyeline statik potansiyel denir. Katodik koruma uygulandıktan sonra çelik yapı katodik olarak polarize olur ve çelik/zemin potansiyeli negatif yönde artış gösterir. Çelik yapı akım altında iken ölçülen potansiyele (E_{on}), akım kesildikten hemen sonra (yaklaşık beş saniye içinde) ölçülen potansiyel değerine de (E_{off}) potansiyeli veya polarizasyon potansiyeli denir. On-Off potansiyelini ölçebilmek için, katodik koruma devresine bir otomatik akım kesici konur. Böylece çelik yapıya 40 saniye akım uygulanırken 20 saniye akım kesilir. Her iki halde çelik/zemin potansiyeli ölçülerek kaydedilir. Akım altında ölçülen (E_{on}) potansiyeli üç ayrı potansiyel değerinin toplamından oluşur.

$$E_{on} = E_o + E_p + E_{IR} \quad (4.6)$$

Burada, E_{on} : Çelik yapı katodik koruma akımı altında iken ölçülen potansiyel,

E_o : Denge potansiyeli, veya statik potansiyel,

E_p : Akımın etkisi ile oluşan polarizasyon potansiyeli,

E_{IR} : Ölçüm devresindeki omik potansiyeldir.

Katodik koruma akımı kesildikten hemen sonra yapılan çelik/zemin potansiyeli ölçümünde, akım kesilmiş olduğu için omik potansiyel $E_{IR} = 0$ olur. Polarizasyon potansiyeli akımın etkisi ile oluşmasına rağmen, E_p potansiyeli akımın kesilmesinden sonra kısa bir süre kalır ve daha yavaş olarak kaybolur. Bu durumda akım kesildikten hemen sonra ölçülmüş olan E_{off} potansiyeli,

$$E_{\text{off}} = E_o + E_p \quad (4.7)$$

toplamından oluşur.

Bu değerler kullanılarak potansiyel ve polarizasyon kayması değerleri şöyle hesaplanır:

$$\text{Potansiyel kayması} = E_{\text{on}} - E_o \quad (4.8)$$

$$\text{Polarizasyon kayması} = E_{\text{off}} - E_o \quad (4.9)$$

4.6. Korozyondan Korunma Yöntemleri

Korozyon kayıplarını mümkün olduğunca azaltmak amacıyla teknolojik olarak uygulanabilen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunların en önemli olanları şöyle sıralanabilir.

- 1) Boya ve kaplama yapılması
- 2) Paslanmaz çelik kullanılması
- 3) İnhibitör kullanılması
- 4) Anodik koruma yapılması
- 5) Katodik koruma yapılması

4.6.1. İnhibitör kullanılması

Ortama az miktarda katıldığında korozyon hızını azaltan maddelere korozyon inhibitörü denir. Metal cinsinin değiştirilmesinin ekonomik olmadığı hallerde, çevrenin korozif özelliğini azaltmak amacıyla inhibitör kullanılması yoluna gidilmektedir. Özellikle soğutma sularında olduğu gibi kapalı sistemlerde, inhibitör kullanımı korozyonla mücadelede en ekonomik yöntemi oluşturmaktadır.

İnhibitörlerin korozyon hızını azaltıcı etkileri çeşitli şekillerde gerçekleşir. Bazı inhibitörler metal yüzeyinde ince bir film oluşturarak, metal ile çevresi arasındaki reaksiyon hızını yavaşlatırlar. Bazı halde ortamda bulunan korozyon yapıcı bileşenin, örneğin oksijenin inhibitör tarafından kimyasal olarak bağlanması ile korozyon önlenir. Etkime şekline göre inhibitörler, anodik inhibitör veya katodik inhibitör olarak ikiye ayrılır. Ancak

korozyonu önleme mekanizmalarını göz önüne alarak inhibitörleri beş ayrı grup altında toplamak mümkündür. Bunlar,

- 1) Anodik inhibitörler
- 2) Katodik inhibitörler
- 3) Oksijen bağlayıcılar
- 4) Film oluşturanlar
- 5) Gaz inhibitörleridir.

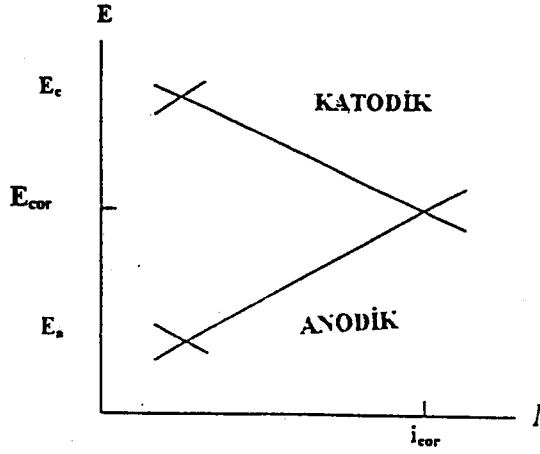
İnhibitörler ancak kapalı sistemlerde kullanılabilir. Çözelti içine ne miktar inhibitör katılacağı bir çok faktöre bağlıdır. İnhibitör kullanırken aynen ilaç kullanır gibi bilinçli olmak gerekir. Yalnız fazla miktarda inhibitör kullanımı değil yetersiz miktarda inhibitör kullanımı da tehlikelidir. Bu nedenle inhibitör cinsi ve konsantrasyonu seçimi pratikte büyük önem taşır. Genel olarak kromat, nitrit gibi oksitleyici özelliği olan inhibitörler diğerlerine göre daha küçük dozlarda etkili olur.

Oksitleyici özelliği olan bir inhibitör çelik yüzeyinde oluşan demir oksit filminin $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ haline dönüşmesini sağlar. Yetersiz dozlarda inhibitör kullanmak korozyon hızını azaltmak yerine artırıcı olarak rol oynamaktadır. Ayrıca inhibitör dozunun yetersiz olması halinde, metal yüzeyinin bazı bölgeleri aktif halde kalacağından, küçük bir anot yüzeyine karşı çok büyük bir katot yüzeyinin oluşmasına ve bunun sonucu olarak son derece tehlikeli çukur tipi korozyon olayının meydana gelmesine neden olacaktır.

4.6.1.1. İnhibitör etkisinin elektrokimyasal mekanizması

Sulu çözeltiler içinde yürüyen korozyon olaylarını elektrokimyasal olarak incelemek üzere anodik ve katodik polarizasyon eğrileri çizilerek Evans Diyagramı elde edilir. Bu diyagramda anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin kesim noktası korozyon akımını verir. Şekil 4.17’de tipik bir Evans Diyagramı görülmektedir (Uhlig, 1971).

Reaksiyonların polarizasyon biçimine göre korozyon hızı (i_{cor}) artar veya azalır. O halde anodik ve/veya katodik polarizasyon eğrilerinin eğimi değiştirilmek suretiyle korozyon hızı azaltılabilir. Eğer elektrolit içine uygun bir inhibitör katılarak polarizasyon eğrilerinden birinin veya ikisinin eğimleri daha dik hale getirilirse, korozyon hızında azalma olacaktır.



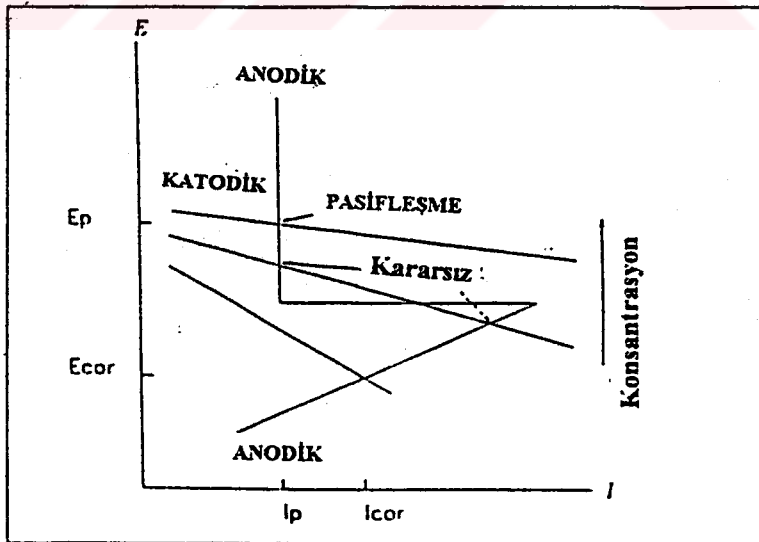
Şekil 4.17 Bir korozyon hücresinde polarizasyon eğrileri

4.6.1.2. İnhibitörlerin sınıflandırılması

İnhibitörler etki biçimlerine göre dört gruba ayrılırlar.

a) Pasifleştirme yoluyla inhibisyon

Bazı inhibitörler metali pasifleştirerek korozyon hızının düşmesine neden olurlar. Şekil 4.18'da inceleme yapılırsa katodik eğri, anodik eğriyi pasif bölgede keserse, korozyon hızı düşüktür. Ortama yeterli miktarda inhibitör katılarak korozyon hızı azaltılabilir. Eğer inhibitör konsantrasyonu yeterli değil ise kararsız hal ortaya çıkabilir. Yani katodik eğri, anodik eğriyi hem pasif hem de aktif bölgede keser. Bu durumda korozyon hızı, hiç inhibitör katılmamış halden daha yüksek değere ulaşabilir (Parker, 1967).



Şekil 4.18 Pasifleşme özelliği olan bir metalde katodik inhibitörün korozyon hızına etkisi

b) Adsorbsiyon yoluyla inhibisyon

Organik inhibitörler metal yüzeyinde adsorbe olarak inhibisyon etkisi gösterirler. Adsorbsiyon olayı, organik bileşiklerde bulunan ve elektronegatif özellikte olan bazı atomların metal tarafından elektron ortaklığı yapılarak yüzeyde tutulması ile meydana gelir. Böylece metal yüzeyi organik bir film ile kaplanmış olur.

c) Çökelme yoluyla inhibisyon

Nötral çözeltiler içinde korozyon sonucu oluşan metal iyonları yüzeyde bir oksit veya hidroksit bileşiği halinde çökebilir. Bazı inhibitörler bu çökeltilerin metal yüzeyine sağlamca yapışmasına yardımcı olurlar. Böylece oluşan film çevreden metal yüzeyine olan oksijen difüzyonunu önler. Bu tip inhibitörler katodik inhibitör olarak kabul edilir.

4.6.2. Anodik koruma yapılması

Anodik koruma, pasifleşme özelliği gösteren bir metalin anodik yönde polarize edilerek pasif hale getirilmesi ilkesine dayanır. Anodik koruma metalleri korozyondan korumak için uygulanan bir elektrokimyasal yöntemdir. Aynen katodik korumada olduğu gibi metale dıştan bir akım uygulanarak koruma sağlanır. Ancak anodik korumanın elektrokimyasal ilkeleri katodik korumadan oldukça farklıdır. Anodik koruma esas olarak bir pasifleştirme işlemi olarak kabul edilebilir. Bu nedenle bu yöntem ancak pasifleşme özelliği olan metallere uygulanabilir. Anodik koruma yapılarak metal sürekli olarak pasif halde tutulabilir. Yukarıda açıklandığı gibi pasif hal, korozyon akımının en küçük olduğu haldir. Ancak en küçük korozyon akımı her zaman yeterli derecede küçük 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 çok şiddetli korozyon olayının söz konusu olduğu ortamlarda korozyon hızını azaltmak amacıyla kullanılabilir. Böylece metalin korozyon hızı , aktif haldeki hızının yaklaşık olarak yüzde birine kadar azaltılabilir.

Bir doğru akım kaynağının pozitif ucu tanka, negatif ucu da, tank içinde çözeltiye sarkıtılmış olan katoda bağlanırsa dıştan akım uygulanarak tank metalinin potansiyeli

anodik olarak artırılır ve pasiflik bölgesine taşınabilir. Bir referans elektrod yardımı ile tank potansiyeli sürekli olarak kontrol edilir. Anodik korumanın aktif bölgeye kayma tehlikesini önlemek için, uygulanan aşırı gerilim değeri, E_{pp} pasifleşme potansiyeli değerinin (**Flade potansiyel**) bir kaç yüz milivolt üzerinde tutulmağa çalışılır. Potansiyeli pasif bölgede sabit tutabilmek için doğru akım devresine bir amplifiyer ünitesi ilave edilir. Böylece sistem için gerekli olan akım otomatik olarak ayarlanmış olur. Metali pasif bölgede tutabilmek için çok küçük bir akım yoğunluğu yeterli olur. Bu nedenle anodik korumada akım giderleri çok azdır.

4.6.2.1. Anodik koruma ve katodik koruma sistemlerinin karşılaştırılması

Anodik ve katodik koruma sistemlerinin her ikisi de korozyonu önlemek üzere kullanılan elektrokimyasal yöntemlerdir. Ancak uygulamada bazı farklılıklar vardır. Katodik korumada metal katodik yönde polarize edilerek termodinamik olarak stabil olduğu bölgeye taşınır. Teorik olarak bu bölgede metalin korozyona uğraması söz konusu değildir. Anodik koruma şiddetli korozif ortamlarda korozyon hızının azaltılması amacıyla uygulanır. Anodik korumada metal anodik yönde polarize edilerek pasiflik potansiyelinden daha pozitif bir potansiyele taşınır. Bu bölgede de metal korozyona uğrar, ancak korozyon hızı korumasız hale göre çok düşüktür. Her iki koruma sistemi arasındaki fark burada kendini gösterir. Anodik koruma için uygulanan dış akım, pasif bölge içinde kalınmış olduğundan katodik koruma yöntemine göre çok düşüktür. Anodik koruma yalnız akım uygulanarak değil, bir kimyasal teknik ile metal pasif hale getirilerek de uygulanabilir. İki koruma sistemi arasında bulunan diğer önemli bir fark da, katodik koruma bütün metallere uygulanabildiği halde, anodik koruma ancak pasifleşme özelliği olan metal veya alaşımlara uygulanabilir.

4.6.2.2. Uygulamada karşılaşılan sorunlar

Pratikte karşılaşılan en büyük sorun, anodik koruma uygulanırken başlangıçta aktif halde olan metal yüzeylerini pasifleştirmek için çok fazla akıma ihtiyaç duyulmasıdır. Bu akım yüzeyler pasif hale geldikten sonra gerekli olan akım yoğunluğunun 100 katından fazladır. Bu durum sistem içinde çok büyük kapasiteli bir trafo-redresör ünitesini gerekli kılmaktadır. Normal işletme sırasında akım ihtiyacı çok azaldığından , bu kadar büyük

kapasiteli bir akım kaynağına ihtiyaç kalmamaktadır. Pratikte bu sakınca aşağıdaki iki yöntemle giderilmeye çalışılmaktadır.

Birincisi , başlangıçta E_{cor} potansiyelinde olan metale anodik dış akım uygulandığında potansiyel pasif bölgedeki E_p potansiyeline çok yavaş olarak taşınmakta ve böylece metalin düşük korozyon hızında pasifleşmesi sağlanmaktadır.

İkinci yöntemde pasifleştirme işlemi çözelti sıcaklığı düşürülerek daha soğuk bir ortamda gerçekleştirilmektedir. Veya çözelti içine pasifleştirmeyi çabuklaştıracı bir inhibitör katılmaktadır. İşletme sırasında gerekli akım ihtiyacı anodik korumada, katodik korumaya göre çok azdır.

4.6.3. Katodik koruma yapılması

Uygulanmasına 1930'lu yıllarda başlanmış olan katodik korumada son yıllarda büyük gelişmeler olmuş ve korozyonla mücadelede en etkili ve en ekonomik yöntem durumuna gelmiştir. Katodik korumanın ilk uygulamaları boru hatları üzerinde olmuştur. Günümüzde iskele ayakları, çelik kazıklar, gemiler, su ve petrol depolama tankları, kimyasal maddeleri taşıyan kaplar, ısı değiştiriciler, betonarme demirleri v.b. bir çok metalik yapı katodik olarak korunmaktadır. Özellikle yüksek basınçlı petrol ve doğal gaz boru hatlarının emniyetle işletilebilmesi ancak katodik koruma yapılarak mümkün olabilmektedir. Katodik koruma daha geniş olarak 5. Bölümde incelenecektir.

5. KATODİK KORUMA VE UYGULAMALARI

Katodik koruma ilk olarak 1824 yılında Sir Humphry Davy tarafından Samarang isimli bir harp gemisi üzerinde denenmiştir. Geminin bakır kaplı gövdesi çinko anotlarla korunmuştur. Ne yazık ki bu ilk uygulama başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Başarısızlığın katodik koruma uygulamasının yanlışlığından ileri gelmediği sonradan anlaşılmıştır. 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 başarısız uygulamadan yaklaşık yüz yıl sonra, bu asrın başlarında uzak mesafelere boru hatları ile petrol taşınması zorunlu hale gelince, yeraltı boru hatlarındaki korozyonu önlemek amacıyla katodik koruma uygulamalarına yeniden başlanmıştır (Peabody, 1967; Morgan, 1985).

Önceleri boru hatları üzerinde başlayan katodik koruma uygulamaları 1950'li yıllardan sonra, tanklar, gemiler, su depoları, baraj kapakları, iskele ayakları, betonarme demirleri ve daha bir çok metalik yapıya yaygın biçimde uygulanmaya başlanmıştır. Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak, özellikle yüksek performanslı yeni anotların bulunması ile katodik koruma korozyonla mücadelede en güvenilir ve de en ekonomik bir yöntem haline gelmiştir.

5.1. Katodik Korumanın Teorik İlkeleri

Katodik koruma metalleri korozyondan korumak üzere kullanılan en etkili yöntemdir. Katodik korumanın temel ilkeleri elektrokimyasal korozyon teorisine dayanır. Buna göre bir elektrokimyasal hücreden net bir akım geçtiğinde anotta oksidasyon reaksiyonu, katotda buna eşdeğer olacak şekilde redüksiyon reaksiyonu yürür. Böyle bir sistem içinde katot bölgesinde hiç bir şekilde korozyon olayı meydana gelmez. Bu teoriye dayanarak bir metalin yüzeyindeki anodik bölgeler katot haline dönüştürülerek korozyon olayı kesin şekilde önlenabilir.

Katodik koruma yapabilmek için, aynı elektrolit içine ikinci bir metal anot görevi yapmak üzere daldırılır. Anot metali eğer korunacak olan metalden daha aktif bir metalden seçilmiş

ise, bu iki metalin bağlantısından galvanik bir pil oluşur. Bu durumda devreden kendiliğinden bir akım geçer. Korunması istenilen metal bu pilin katodu olacağından korozyona uğramaz. Buna karşılık devreden geçen akım miktarı ile eşdeğer olarak anot metali çözünerek iyon haline geçer. Böylece yürüyen galvanik anotlu katodik koruma sistemleri büyük ölçekli bir galvanik pil gibi çalışır.

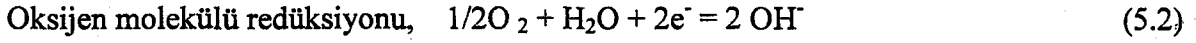
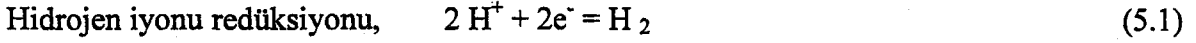
Katodik koruma inert anotlar ile de uygulanabilir. Bu durumda sisteme dıştan bir doğru akımın uygulanması gerekir. Doğru akım kaynağının (+) ucu anoda, (-) ucu da korunacak olan metal yapıya bağlanır. Böylece bir elektroliz hücresi elde edilmiş olur. Bu hücrenin katodunda redüksiyon, anodunda da oksidasyon reaksiyonları meydana gelir. Ancak anotdaki reaksiyon metalin çözünmesi şeklinde olmaz. Anotda inert metaller kullanılmış olduğu için başka tipde oksidasyon reaksiyonları örneğin oksijen çıkışı meydana gelir. Katodik koruma, korunacak metali oluşturulacak bir elektrokimyasal hücrenin katodu haline getirerek metal yüzeyindeki anodik akımların giderilmesi işlemidir.

Korozyon olayında elektronlar anottan katoda doğru metal üzerinden akar. Katot reaksiyonu anottan gelen bu elektronları kullanarak yürüyebilir. Eğer katotda bu elektronlar kullanılamaz ise, bu durumda anottaki oksidasyon reaksiyonu da yürüyemez. Yani katot bölgesinde yeterli oksijen bulunmazsa korozyon meydana gelmez. Diğer taraftan eğer katot reaksiyonu için gerekli elektronlar bir dış kaynaktan verilecek olursa, anot reaksiyonu ile elektron üretilmez. Bu durumda anotta yürüyen korozyon olayı da durmuş olur. Dış akım kaynaklı katodik koruma ile korozyonun önlenmesi bu elektrokimyasal ilkeye dayanır. Metale dıştan uygulanan akım ile verilen elektronlar, metal yüzeyinde yürümekte olan anodik reaksiyonları tam olarak durdururken, katodik reaksiyonun hızını da artırır. Anot reaksiyonları artık korunmakta olan metal yüzeyinde değil, katodik koruma devresinde bulunan yardımcı anotta yürür. Korunmakta olan metal yüzeyi ise artık tam olarak katot olur (Peterson, 1959).

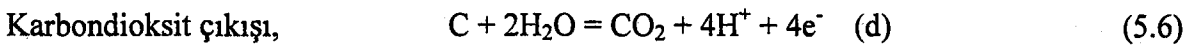
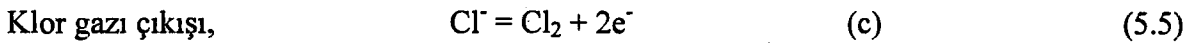
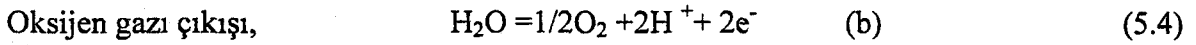
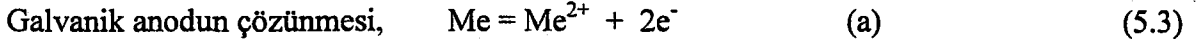
Korozyona uğramakta olan bir metale kendinden daha aktif bir metal (galvanik anot) bağlanacak olursa, bu durumda katot reaksiyonu için gerekli olan elektronlar galvanik anot olarak bağlanan metalin kendiliğinden yürüyen yükseltgenme reaksiyonu ile karşılanır. Böylece korunan metal yüzeyindeki bütün anodik reaksiyonlar tam olarak durur. Galvanik

anotlu katodik koruma da bu temel ilkeye dayanır. En genel halde bir katodik koruma sisteminin katot ve anodunda aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelebilir.

Katot reaksiyonları :



Anot reaksiyonları :



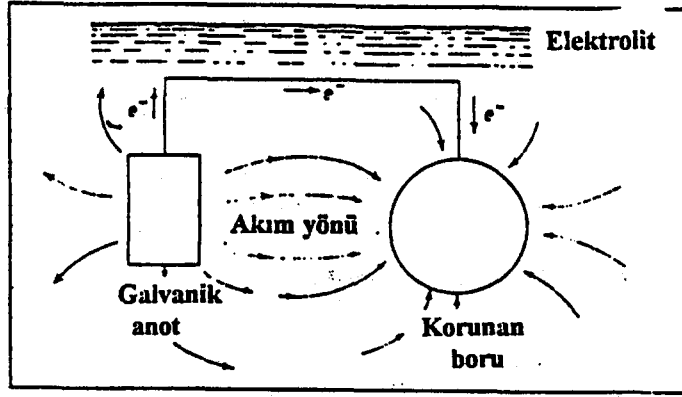
Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin anotlarında (a) reaksiyonu gerçekleşir. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin anot yataklarında ise, ortam koşullarına göre diğer üç reaksiyondan biri meydana gelir. Zemin ve tatlı sular içinde (b) reaksiyonu, deniz suyu içinde (c) reaksiyonu ve grafit anotlar ile kok tozu anot yataklarında da (d) reaksiyonu söz konusu olur. Bu açıklamalar ışığında teorik ilkeleri aynı olan iki tip katodik koruma sistemi:

- Galvanik anotlu katodik koruma sistemi
- Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi' dir.

Genel ilke olarak dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde kullanılan anotların permanant özellikte olması, yani hiç bir kimyasal reaksiyona girmeden ve polarize olmadan uzun süre dayanmaları istenir. Buna rağmen bu anotlar akım geçtikçe az da olsa kütle kaybına uğrayabilir.

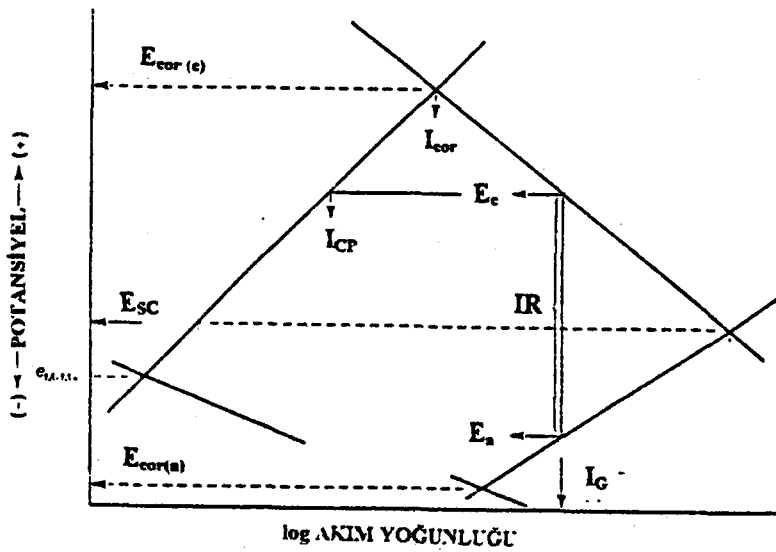
5.2. Galvanik Anotlu Katodik Koruma

Korozyona uğramakta olan bir metale kendinden daha aktif bir metal (galvanik anot) bağlanacak olursa, bu durumda katot reaksiyonu için gerekli olan elektronlar galvanik anodun çözünmesi ile karşılanır. Örneğin bir çelik boru hattını galvanik anotlarla katodik olarak korumak için, boru hattına kendinden daha aktif bir metal, örneğin magnezyum bağlanarak bir galvanik hücre oluşturulur (Şekil 5.1) (Shreir, 1977; Tefankjian, 1970; Daley ve Ingraham, 1996).



Şekil 5.1 Galvanik anotlarla katodik koruma

Böylece oluşturulan galvanik pilde magnezyum anot, çelik de katot olur. Anotta magnezyum çözünerek elektron açığa çıkarır. Bu elektronlar katodik reaksiyonun elektron ihtiyacını karşılar. Korunmakta olan metal yüzeyindeki bütün anodik reaksiyonlar tam olarak durur. Galvanik anotlu katodik koruma bu temel ilkeye dayanır. Zemin içinde akım yönü anottan katoda doğrudur. Katodik koruma devresinden akım geçebilmesi için anot ve katot arasında bir potansiyel farkının olması gerekir. Devreden geçen akım şiddeti, anot katot arasındaki bu potansiyel farkına (yürütücü kuvvet) ve devre direncine bağlıdır. Katodik korumanın sağlanması için korunacak metal yapının potansiyelinin belli bir değere çıkarılması gerekir. Pratikte bu işlem yapıya yeterli sayıda anot bağlanarak sağlanabilir. Şekil 5.2'de galvanik anot olarak çinko kullanılan bir katodik koruma sisteminin polarizasyon eğrileri görülmektedir (Shreir, 1977).



Şekil 5.2 Galvanik anotlu bir katodik koruma sisteminin polarizasyon diyagramı

Şekilden görüldüğü üzere, korunacak metalin başlangıçtaki potansiyeli $E_{cor(e)}$ korozyon akımı da i_{cor} dır. Kullanılan anodun bağlantı yapılmadan önceki potansiyeli de $E_{cor(a)}$ dır. Anot ve katot birbirine bağlandıktan sonra sistem potansiyeli E_{sc} değerini alır. Fakat anot ve katot arasında (R) Ohm kadar bir direnç bulunduğundan katodik koruma devresinden ancak I_G kadar bir galvanik akım geçebilir. Anot ve katot potansiyelleri arasında da $\Delta E = IR$ kadar bir fark oluşur. Katodik koruma uygulandıktan sonra katot potansiyeli E_c , anot potansiyeli de E_a değerini alır. Böyle olunca katodik koruma sonucu metal korozyonu i_{cp} değerine düşürülmüş olur. Şekilden görüleceği üzere, galvanik anottan çekilen (i_G) akımı, galvanik anodun açık devre potansiyeli ile devre direncinin büyüklüğüne bağlıdır. Katodik koruma devre direncinin büyük bir kısmını anot yatağı direnci oluşturur. Sonuç olarak, katot potansiyelinin istenilen bir değere inmesini sağlamak için, anot yatağı direncinin belli bir değerin altına düşürülmesi gerekir.

5.2.1 Galvanik anotlar

Demir ve çelik yapıların katodik korunmasında galvanik anot olarak magnezyum, çinko ve alüminyum metal ve alaşımları kullanılır. Bu anotların elektrokimyasal özellikleri Çizelge 5.1'de verilmektedir (BS 1071, 1991).

Çizelge 5. 1 Galvanik anotların elektrokimyasal özellikleri

ÖZELLİKLER	Mağnezum	Çinko	Alüminyum
Teorik akım kapasitesi, A.saat/kg olarak kg/A.yıl olarak	2200 3,94	820 10,66	2965 3,15
Gerçek akım kapasitesi, A.saat/kg olarak kg/A.yıl olarak	1100 7,88	738 11,84	2670 3,50
Anot akım verimi, (*)	% 50	% 90	% 90
Elektrot potansiyeli, Volt (**) (Doygun Cu/CuSO ₄ referans elektroduna göre, deniz suyu içinde)	-1,55	- 1,10	-1,10
Çeliğe karşı devre potansiyeli, mV	650	250	250

(*) Anot verimi anottan çekilen akım şiddetine de bağlıdır. Tabloda verilen değerler 0,03 mA/cm² akım yoğunluğu içindir.

Galvanik anot olarak genellikle saf metal yerine düşük yüzdeli alaşımlar tercih edilmektedir. Diğer taraftan metal içine bazı elementler katılarak anodun elektrokimyasal özellikleri iyileştirilmektedir. Galvanik anotların potansiyeli aşağıdaki kriterler ile belirlenir.

- **Anot potansiyeli**

Galvanik anodun potansiyeli, korunması istenilen metali katodik olarak polarize edecek kadar negatif olmalıdır. Anot ve katot arasındaki potansiyel farkı katodik koruma akımının geçmesini sağlayan yürütücü kuvvettir. Bu potansiyel farkının katodik koruma devresi direncini yenecek büyüklükte olması gerekir. Düşük potansiyelli anotların yüksek rezistiviteli zeminler içinde kullanılması mümkün olmaz. Demir ve çeliği katodik olarak koruyabilmek için katot potansiyelinin doymuş bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre -850 mV ' dan daha negatif bir değere düşürülmesi gerekir. Ayrıca katodik koruma devresinde anot yatağının , kabloların ve zeminin direncinin oluşturduğu IR potansiyel düşüşünün karşılanması ve devreden katodik korumaya yetecek kadar bir akımın geçmesi sağlanmalıdır (Turnipseed, 1996).

- **Anot polarizasyonu**

Galvanik anotların üniform biçimde çözünerek düzgün bir akım çıkışı sağlaması istenir. Deniz suyu içinde bu mümkün olmakla beraber, zeminler içinde anodun kısa sürede polarize olduğu görülür. Anotların çözünmesi sonucu ortaya çıkan metal iyonları, anodun yüzeyinde ve çevresinde hidroksit halinde çökerek anot direncinin artmasına ve potansiyelinin pozitif yöne doğru kaymasına neden olur. Polarizasyon sonucu anot akım çıkışı zamanla azalır. Diğer taraftan anot harcandıkça aktif yüzey alanı da gittikçe küçülür. Anot polarizasyonunu önlemek ve anodun üniform şekilde akım üretmesini sağlamak için galvanik anotlar uygun bir anot yatağı malzemesi içine konulur.

- **Anot direnci**

Anot yatağı direncini belirlemek için her şeyden önce zemin içinde bulunan tek anot direncinin hesaplanması gerekir. Anot direnci, anodun dikey veya yatay konumda bulunmasına göre birbirinden farklıdır.

$$R_d = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad (5.7)$$

$$R_y = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (5.8)$$

Burada, R_d : Dik olarak yerleştirilen tek anot direnci (Ohm)

R_y : Yatay olarak yerleştirilen tek anot direnci (Ohm)

ρ : Anot yatağı rezistivitesi (Ohm.cm)

L : Anot boyu (m) (Anot yatağı dahil)

d : Anot çapı (cm) (Anot yatağı dahil) 'dır.

• Anot akım kapasitesi ve verimi

1 kg anot metalinin üretebildiği A.saat/kg olarak akım miktarına anot akım kapasitesi denir. Pratikte kapasite yerine daha çok bunun tersi, 1 A.yıl akım üretebilen anot kütlesi (kg /A.yıl) değeri kullanılır.

$$\text{Anot akım kapasitesi} = \frac{\text{Anot akım çıkışı (A.saat)}}{\text{Anot kütlesi (kg)}} \quad \text{A.saat/kg} \quad (5.9)$$

Teorik akım kapasitesi, Faraday yasasına dayanılarak hesap edilir . Gerçek akım kapasitesi bundan daha küçüktür. Gerçek akım kapasitesinin, teorik akım kapasitesine oranı “**Anot akım verimi**”olarak bilinir.

$$\text{Anot akım verimi} = \frac{\text{Gerçek akım kapasitesi}}{\text{Teorik akım kapasitesi}} 100 \quad (5.10)$$

• Anot ömrü

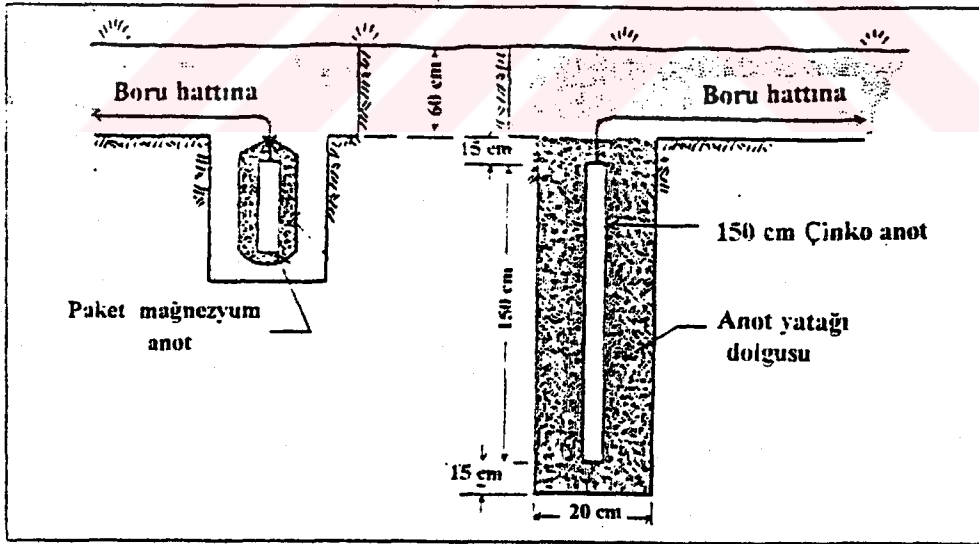
Birim kütledeki bir anottan çekilebilecek maksimum akım miktarına **teorik akım kapasitesi** denir. Bu miktar A.saat/kg veya kg/A.yıl olarak ifade edilir. Bu değer kullanılarak belli miktarda bir akım ihtiyacı için kaç kg anot kütlesinin gerekli olduğu veya belli kütledeki bir anodun kaç yıl dayanacağı (ömrü) hesaplanabilir. Ancak pratikte anot ömrüne etki yapan iki önemli faktörün de göz önünde bulundurulması gerekir. Bunlardan

biri **anot akım verimi** 'dir. 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 kütlesinin en çok %85 inin kullanılabileceği kabul edilir.Bu durumda anot ömrünün hesabında aşağıdaki formül kullanılabilir

$$\text{Anot ömrü (yıl)} = \frac{\text{Anot kütlesi(kg)} \cdot \text{Anot verimi} \cdot \text{Kullanma faktörü}}{\text{Akım şiddeti(A)} \cdot \text{Teorik akım kapasitesi(kg/A.yıl)}} \quad (5.11)$$

• Anotların montajı

Yeraltında kullanılmak üzere torbalanmış hazır galvanik anotlar vardır. Bu anotlar doğrudan çukurlar içine yerleştirilebilir. Çıplak haldeki galvanik anotları yeraltına yerleştirebilmek için, önce açılan çukur içine anot yatağı malzemesinin üçte biri konur, daha sonra anot ortalanarak çevresi anot yatağı dolgu maddesi ile doldurulur. Paket halinde veya çıplak halde galvanik anot montajı Şekil 5.3'de görülmektedir (Peabody, 1967).



Şekil 5.3 Galvanik anotların yeraltına konulması

Anotların zemin rezistivitesinin en düşük olduğu bölgelere konulması uygundur. Birden fazla anodun çeliğe bir noktadan bağlanması halinde, anotlar önce paralel olarak bağlanır

,daha sonra bir grup halinde çeliğe kaynak edilir. Anot bağlantısı **termit kaynağı** ile yapılmalıdır.

- **Anot cinsi ve boyutu**

Galvanik anotlardan çekilen akım şiddeti,anot katot arasındaki potansiyel farkı ile anot direncine bağlıdır. Dolayısıyla anot direnci ne kadar azaltılabilirse, anottan çekilen akım şiddeti de o oranda artar.Böyle olunca bir anot yerine eşit kütlede iki küçük anot kullanılarak anot akım çıkışı artırılabilir.Özellikle yüksek rezistiviteli zeminler içinde küçük boyutlu çok sayıda anot kullanılması daha uygundur. Boyutları belli olan bir galvanik anodun, rezistivitesi bilinen bir zemin içindeki direncini hesaplıyarak, buradan anottan çekilebilecek maksimum akım şiddetini bulmak mümkündür.

5.2.2 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 anot yatağı rezistivitesi 50 Ohm.cm ' ye kadar düşürülür. Eğer zemin rezistivitesi 500 Ohm.cm'den daha düşük ise, bu durumda anot yatağı malzemesine gerek kalmadan magnezyum anotlar doğrudan zemin içine konulabilir.

Galvanik anotların bir anot yatağı içine konulması şu avantajları sağlar .

- 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 rezistiviteli zeminler içinde de kullanabilmek mümkün olur (Uhlig, 1971).

- Galvanik anot seçimi

Galvanik anotlardan çekilen akım şiddeti, anot - katot arasındaki potansiyel farkı ile anot direncine bağlıdır. Dolayısıyla anot direnci ne kadar azaltılabilirse, anottan çekilen akım

şiddeti de o oranda artar. Böyle olunca anot yüzey alanı artırılarak örneğin bir anot yerine eşit kütlede küçük boyutlu iki anot kullanılarak, anot akım çıkışı artırılabilir. Özellikle yüksek rezistiviteli zeminler içinde küçük boyutlu çok sayıda anot kullanılması daha uygundur.

- Galvanik anotların montajı

Galvanik anotlar zemin içinde açılmış çukurlara anot yatağı malzemesi ile paketlenmiş olarak konulur veya çukur içine anot konulduktan sonra çevresi anot yatağı malzemesi ile doldurulur. Galvanik anotlarda anot yatağı malzemesi olarak daha önce belirtilmiş olduğu üzere bentonit + alçı ' dan oluşan bir karışım kullanılır. Çinko anotların kullanılması halinde dolgu malzemesi içine % 25 oranında sodyum sülfat da katılır. Böylece anot yatağı rezistivitesi 50 Ohm.cm ' ye kadar düşürülür. Eğer zemin yapısı uygun ise , anotların boru seviyesinin yaklaşık 1 m altına yerleştirilmesi daha faydalıdır. Böylece daha derine gömülmüş olan anotların meteorolojik olaylardan etkilenmesi önlenmiş olur. Bu anotlar sürekli olarak rutubetli bir zemin içinde kalacaklarından akım çıkışları üniform bir seyir gösterir. Diğer taraftan anodun yabancı inşaat faaliyetlerinden zarar görmesi ihtimali de azalır.

- Anot yatağı direnci

Yeraltına konulmuş olan bir anodun direnci anot boyutları (çap ve boy) ile söz konusu zeminin rezistivitesine 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 silindir 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.) Anot direnci (5.7) ve (5.8) eşitlikleri ile hesaplanır.

Paralel olarak bağlanmış (n) sayıda anodun (s m) aralıklarla bağlanması halinde anot yatağı toplam direnci için de aşağıdaki bağıntı kullanılabilir (Peabody, 1967).

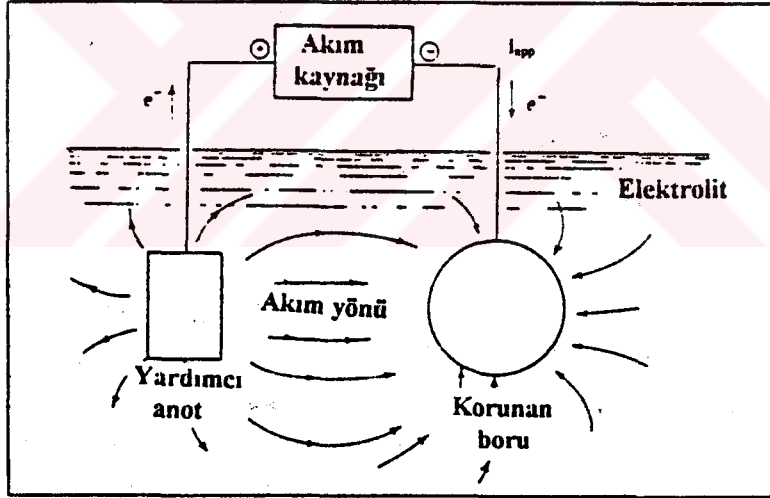
$$R = \frac{\rho}{2 \pi L n} \left[\ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{s} \ln 0,656 n \right] \quad (5.12)$$

Burada, n : Paralel bağlanmış anot sayısı,
 s : Anotlar arasındaki mesafe (cm) dir.

5.3. Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sistemleri

5.3.1 Dış akım kaynaklı katodik koruma sisteminin teorik ilkeleri

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde metale bir dış akım uygulanarak katot haline gelmesi sağlanır. Dıştan uygulanan akım ile verilmiş olan elektronlar, metal yüzeyinde yürümekte olan anodik reaksiyonları tam olarak durdururken, katodik reaksiyonun hızını da artırır. Dış akımın uygulanmasından sonra anot reaksiyonları korunmakta olan metal yüzeyinde değil, katodik koruma devresinde bulunan yardımcı anotta yürür. Korunmakta olan metal yüzeyi ise artık tam olarak katot olur. Bu amaçla bir transformatör redresör sisteminden elde edilen doğru akımın (-) ucu korunacak olan metal yapıya, (+) ucu da bir yardımcı anoda bağlanır (Şekil 5.4)(Shreir,1977).



Şekil 5.4 Bir boru hattının dış akım kaynağı ile katodik olarak korunması

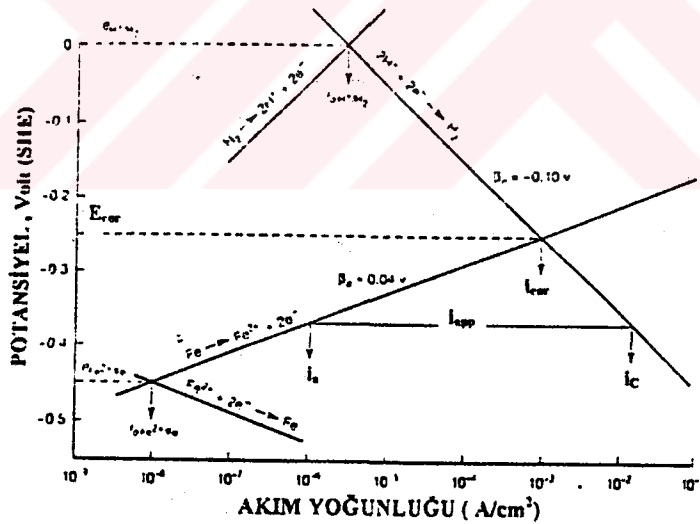
Yardımcı anot yüzeyinde oksidasyon reaksiyonları meydana gelir. Akım zemin içinden katoda doğru akar ve metal yapı üzerinden devresini tamamlar. Uygulanacak olan katodik koruma akımının şiddeti korunacak metalin yüzey alanına ve metalin içinde bulunduğu ortamın korozyon derecesine bağlıdır. Transformatör-redesör ünitesinin DC çıkış voltajı

ise, katodik koruma devresinin toplam direncine, büyük ölçüde anot yatağının direncine bağlıdır.

Katodik koruma uygulamalarında en önemli konu, korunacak yapının katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesidir. Metali tam olarak korumak için gerekli olan minimum akım şiddeti deneysel olarak veya, katot ve anot reaksiyonlarının polarizasyon eğrileri çizilerek teorik olarak belirlenebilir. Örnek olarak demirin asidik bir çözelti içindeki korozyonunu ele alalım. Asidik bir ortamda çeliğin korozyonunda katodik reaksiyon hidrojen çıkışı şeklinde yürür. Anotta ise demir korozyona uğrayarak iyon haline geçer. Böylece oluşan korozyon olayında anot ve katot reaksiyonları şöyledir.



(5.13) ve (5.14) eşitliklerine göre hazırlanmış grafik Şekil 5.5'te gösterilmektedir. (Shreir, 1977; Jones, 1992)



Şekil 5.5 Asitli ortamda çeliğin dış akım kaynağı ile katodik olarak korunması

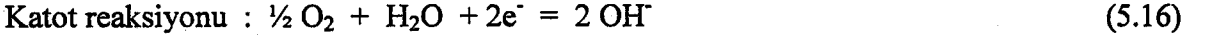
Bu grafiğe göre denge halinde bir karma potansiyel oluşur ve çeliğin potansiyeli E_{cor} değerini alır. Korozyon hızı, anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin kesim noktasına

karşı gelen i_{cor} 'dır. Şekilde verilen örnekte asitli bir ortamda bulunan demir için $E_{cor} = -250$ mV , $i_{cor} = 10^{-3}$ A /cm² dir. Korozyona uğramakta olan böyle bir çeliğe katodik yönde bir dış akım uyguladığımızı düşünelim. Katodik koruma sonucu çeliğin potansiyeli negatif yönde 120 mV artarak - 370 mV ' a düşmüş olsun. Şekilden görüleceği üzere, katodik koruma sonucu çeliğin korozyon hızı başlangıçtaki korozyon hızının binde birine yani 10^{-6} A/cm² ye (1 μ A/cm²) düşürülmüş olur. Bunu sağlamak için çeliğe $i_{app} = 10^{-4}$ μ A/cm² kadar bir dış akım uygulanmıştır. Grafikten açıkça görüldüğü üzere, uygulanan dış akım ile korozyon hızının ne derece azalacağı, anodik polarizasyon eğrisinin eğimine ,yani β_a değrine bağlıdır. Şekilde verilen örnekte $\beta_a = 40$ mV dir. Yani metal katodik yönde 40 mV polarize edildiğinde korozyon hızında 10 kat düşüş olmaktadır.

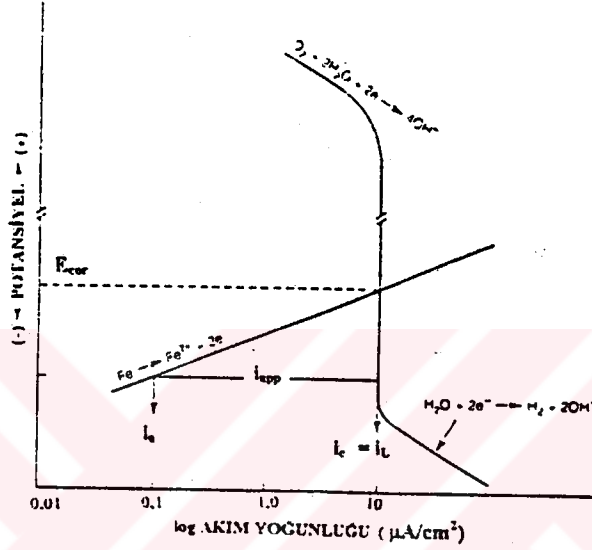
Bu örnekten, katodik koruma akım ihtiyacının yalnız anodik polarizasyon eğrisi ile değil, katodik polarizasyon eğrisinin eğimi ile de ilgili olduğu açıkça görülmektedir. Asitli bir ortam için verilmiş olan bu örnekte, çeliğin katodik korumasını sağlamak için $i = 10^{-2}$ A/cm² lik bir dış akım uygulanması gerekmiştir. Yani asitli ortamda bulunan 1 m² lik çıplak çelik yüzeyini katodik olarak korumak için 100 A bir dış akıma ihtiyaç vardır. Bu kadar yüksek bir akım uygulanarak yapılan katodik koruma ekonomik olmaz. Bu nedenle pratikte asidik çözeltiler içinde katodik koruma uygulanması yoluna gidilmez. Eğer mutlaka gerekli ise, metal yüzeyine uygun bir kaplama yapılarak akım ihtiyacı azaltılır.

Doğal sular ve zeminler gibi nötral ortamlarda yapılan katodik koruma, yukardaki örnekte verilen asitli ortamlardakinden biraz farklıdır. Aradaki fark nötral çözeltiler içinde katodik reaksiyonun hidrojen çıkışı şeklinde değil de, çözünmüş oksijenin redüksiyonu ile yürümesinden kaynaklanır. Bu durumda çeliğin korozyon hızı ,metal yüzeyine oksijen difüzyon hızının kontrolü altındadır. Su içinde oksijen difüzyon hızı çok yavaş olduğundan , nötral ortamlarda çeliğin korozyon hızı da oldukça düşüktür. Şekil 5.6'da nötral ve havalandırılmış bir sulu çözelti içinde bulunan demire dış akım kaynaklı katodik koruma uygulanmasının polarizasyon eğrileri görülmektedir (Jones, 1992). Burada anodik reaksiyon ile yine demir çözünmekte, buna karşılık katodik reaksiyon oksijen redüksiyonu şeklinde yürümektedir.





Şekilde verilmiş olan örnekte, katodik koruma uygulanmadan önce çeliğin korozyon hızının $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olduğu görülmektedir. Bu değer genellikle hareketli sularda mümkün olur. Durgun sular içinde oksijen difüzyonu daha yavaş ve korozyon hızı daha da küçüktür.



Şekil 5.6 Çeliğin nötral bir ortamda dış akım kaynağı ile katodik korunması

Diğer taraftan durgun sular içinde oluşan korozyon ürünleri metal yüzeyinde çökerek kabuk oluşturur. Bu kabuk korozyon hızında büyük ölçülerde azalmalara neden olur.

Şekilden görüldüğü üzere oksijen redüksiyonu ile gerçekleşen katodik polarizasyon eğrisi bir limit akıma erişmektedir. Bu durumda korozyon hızı limit akım yoğunluğuna eşit olmaktadır. Böyle bir çeliği katodik olarak korumak için , önceki örnekte olduğu gibi yine katodik yönde 120 mV polarize etmiş olduğumuzu düşünelim. Katodik koruma sonucu çeliğin korozyon hızı $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine düşecektir. Bunu sağlamak için katodik koruma devresine $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lik bir dış akımın uygulanması gerekecektir. Bu değer katodik reaksiyonun limit akımı ile sınırlıdır.

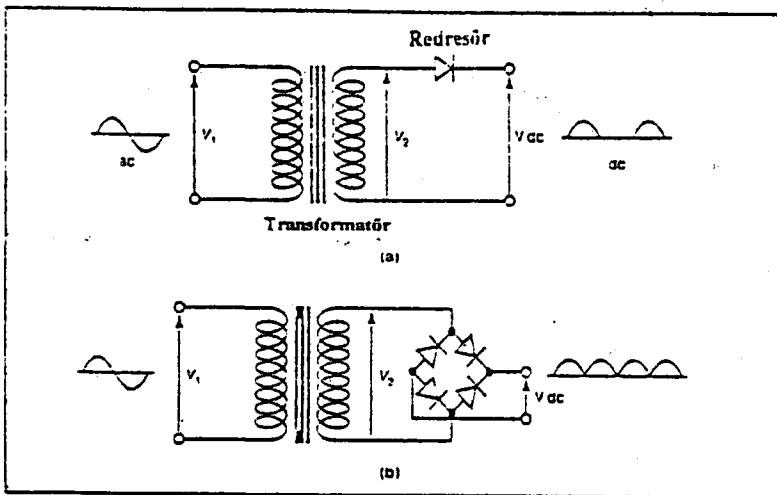
Şekilden aşırı korumanın zararlı etkisi de açık olarak görülmektedir. Eğer çelik katodik yönde gereğinden fazla polarize edilerek potansiyeli negatif yönde daha fazla artırılacak olursa, katot reaksiyonunda değişme olmaktadır. Artık katotda yalnız oksijen redüksiyonu reaksiyonu değil, suyun elektrolizi ile hidrojen çıkış reaksiyonu da gerçekleşmektedir.



Katotda hidrojen gazı çıkışının bazı sakıncaları vardır. Açığa çıkan hidrojen gazı metal yüzeyinde bulunan kaplamanın soyulmasına neden olabilir. Ayrıca stres korozyonunun söz konusu olduğu ortamlarda, metal yüzeyinde açığa çıkan hidrojen atomları molekül halinde uzaklaşmak yerine atom halinde metal yapısına girerek orada hidrojen kırılganlığına neden olabilir. Üstelik aşırı koruma halinde katodik koruma için harcanan akım da gereksiz yere artırılmış olur.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde, galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinden farklı olarak akım ve potansiyel istenildiği kadar artırılabilir. Bu nedenle bir anot yatağı ile çok uzun boru hatları korunabilir. Ancak aşırı korumaya neden olmaması için boru/zemin potansiyelinin akım uygulanan noktada belli bir değerin üzerine çıkarılmaması gerekir. Bir noktadan korunabilen boru uzunluğu, borunun cinsine (çapına ve boru et kalınlığına), kaplama kalitesine ve katodik koruma akım ihtiyacına bağlıdır.

5.3.2 Transformör - Redresör üniteleri



Şekil 5. 7 Alternatif akımı doğru akıma çeviren (a) yarım dalga , (b) tam dalga doğru akım üreten redresör üniteleri

Katodik koruma sistemlerinde, şebekeden alınan tri faze veya monofaze alternatif akım bir trafo – redresör ünitesinden geçirilerek ve potansiyel istenilen seviyeye düşürülerek doğru akım haline dönüştürülür (Şekil 5.7) (Jones, 1992; Ashworth, 1986; Dabkowschi, 1995; Mac Millan, 1993).

5.3.3 Dış akım kaynaklı anotlar

Bir katodik koruma devresinden akım geçebilmesi için anot ve katot yüzeylerinde aynı anda ve eşdeğer miktarda kimyasal reaksiyonların yürümesi gerekir. Anot ve katot yüzeylerinde yürüyen kimyasal reaksiyonlar katodik koruma sistemlerinin performansını belirleyen en önemli kriterlerdir. Başlıca anot tipleri şunlardır (Yalçın ve Koç, 1992).

- Grafit Anotlar
- Demir Silikon Anotlar
- Gümüş Kurşun Anotlar
- Platin Kaplanmış Titanyum Anotlar
- Metal Oksit Kaplı Titanyum Anotlar
- Magnetit Anotlar

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde anot reaksiyonu galvanik anodun çözünmesi şeklinde yürüdüğü halde, dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde anot metali ve elektrolit cinsine bağlı olarak anot yüzeyinde çeşitli reaksiyonlar meydana gelir. Anot reaksiyonu anodun verimine ve ömrüne doğrudan etki yapar. Metal cinsi ne olursa olsun, anotta daima bir oksidasyon reaksiyonu meydana gelir. Anot yüzeyinde hangi oksidasyon reaksiyonunun yürüyebileceğini ortam koşullarına bağlı olarak muhtemel reaksiyonların serbest entalpi değişimleri belirler. Ancak gaz çıkışı reaksiyonlarında metal yüzeyinde aşırı gerilim oluşabilir. Yine bunun gibi anotta meydana gelen bazı kimyasal bileşiklerin anot yüzeyinde çökmesi ile metal-elektrolit ara yüzeyinde yürümesi beklenen reaksiyonun hızı yavaşlayabilir. Bütün bunlar anot reaksiyonlarını oldukça karışık bir hale dönüştürür. Su veya zemin içinde bulunan bir anodun yüzeyinde yürüyen başlıca anot reaksiyonları şunlardır. (Schrieber ve Mussinelli, 1987)

- **Metalin oksitlenme reaksiyonu**

Örneğin hurda demirin yardımcı anot olarak kullanılmasında olduğu gibi, soy olmayan anot metalleri galvanik anotlara benzer şekilde oksitlenerek metal iyonu halinde çözeltiye geçerler. Oluşan metal iyonları nötral ortamlarda su ile reaksiyona girerek hidroksit haline dönüşebilir. Metal hidroksitlerin çözünürlüğü genellikle azdır. Bu nedenle anot yüzeyinde çökelerak kabuk oluştururlar. Bu reaksiyonlar sonucu anot bölgesi asidik bir karakter kazanır. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde demir ve alüminyum gibi soy olmayan metal alaşımları kullanılması halinde anotlar aynen galvanik anotlar gibi çözünerek kısa sürede harcanırlar.

- **Anottan oksijen çıkışı**

Anot soy bir metal ise (veya pasifleşmiş ise) anotta suyun ayrışması sonucu oksijen çıkışı meydana gelebilir. Bu reaksiyon sonucunda da anot civarında asidik bir ortam oluşur. Tatlı sularda ve zemin içinde hakim anot reaksiyonu yukarda verilen reaksiyonda olduğu gibi oksijen çıkışı şeklindedir.

- **Anottan klor çıkışı**

Deniz suyu içinde veya klorür konsantrasyonu yüksek olan diğer tuzlu sular içinde anotta oksijen yerine (veya onunla birlikte) klor gazı çıkabilir. Açığa çıkan klor gazı su ile reaksiyona girerek, hipokloröz asidi oluşturur. Bu asit zayıf bir asit olduğundan klor çıkışı halinde anot bölgesinde pH düşüşü çok fazla olmaz.

Anotta oksijen veya klor gazlarından hangisinin çıkacağı elektrolit içinde bulunan klorür konsantrasyonuna ve anot metali üzerinde söz konusu gazların aşırı gerilim değerlerine bağlıdır. Standart elektrot potansiyelleri klor için -1.36 Volt, oksijen için -0.40 Volt'dur. Deniz suyu içinde klorun ayrışma gerilimi -1.39 Volt, oksijenin ayrışma gerilimi -0.81 Volt olmasına rağmen oksijen aşırı geriliminin yüksek oluşu nedeniyle (demir yüzeyinde 1 mA/cm² akım yoğunluğunda oksijen aşırı gerilimi 0.70 Volt) deniz suyu içinde çok yüksek olmayan akım yoğunluklarında genellikle anotta klor çıkışı olur.

- **Karbondioksit çıkışı**

Zemin içinde kullanılan anotlar genellikle kok tozundan oluşan bir anot yatağı içine konulur. Bu tip anot yataklarında anot reaksiyonu, karbonun karbon dioksit veya karbon monoksit kadar oksitlenmesi şeklindedir. Bu reaksiyonlar için kok tozunun ıslak halde olması gerekir. Reaksiyon sonunda anot bölgesi diğer anot reaksiyonlarında olduğu gibi yine asidik bir karakter kazanır.

5.3.3.1. Anotlardan beklenen özellikler

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde çok çeşitli cins ve boyutta anot kullanılmaktadır. Anot seçiminde gözönüne alınacak temel kriterler şöyle özetlenebilir.

- 1 -Katodik koruma sistemlerinde ilk tesis maliyetinin yaklaşık yarısı anotlara harcanır. Bu nedenle anot metalinin ucuz olması ekonomik açıdan önem taşır.
- 2 -Anot birim yüzeyinden çekilebilen akım mümkün olduğunca yüksek olmalı ve anot direnci zamanla fazla artış göstermemelidir.
- 3 -Anottan çekilen birim akım (A.yıl) başına anot kütle kaybı mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Anotlar kendilerinden beklenen süre ve miktarda akım üretebilmelidir.

Bunun dışında anotlar sağlam, hafif ve kimyasal etkilere dayanıklı olmalı ve çevreyi kirletici toksik maddeler yaymamalıdır. Ticari anotlar değerlendirilirken yalnız fiyatı değil, bütün bu teknik özelliklerinin de göz önüne alınması gerekir.

5.3.4 Dış akım kaynaklı anot yatakları

Anot yatakları katodik koruma sistemlerinin en önemli ünitesini oluşturur. Proje maliyetinin büyük bir kısmı anot yatağının malzeme ve montajına aittir. Sistemin performansı ve ömrü doğrudan anot yatağına göre belirlenir. Bu nedenle katodik koruma projelerinde anot yatağı yerinin belirlenmesi, kullanılacak anot cinsi ve sayısının tayini ve anot yatağı direncinin hesaplanması büyük önem taşır (Reding ve Mudd, 1990).

a) Anot yatağı dolgusu

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde kullanılan yardımcı anotlar bir anot yatağı içine konur. Anotlar yatak içine yerleştirilirken anot çevresi kok tozu ile doldurulur. Anot yatağı içine konulan kok tozu dolgusu, anot etkin boyutlarını artırarak anot yatağı direncini

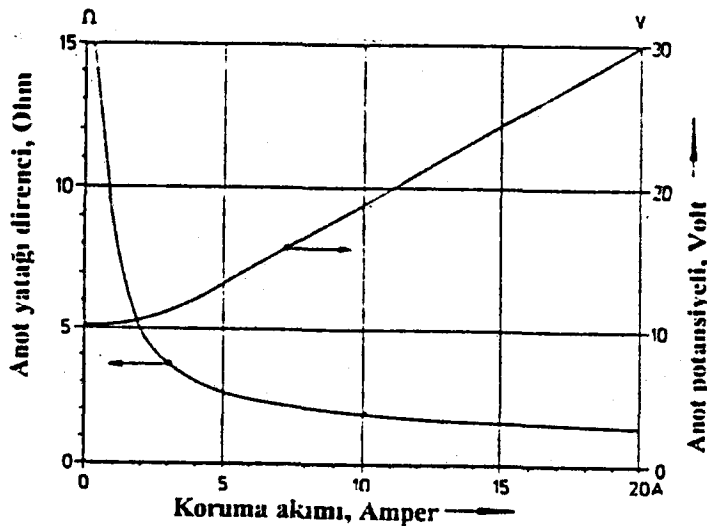
düşürür ve anot kütle kaybını azaltıcı rol oynar. Anot yatağı dolgu maddesi olarak grafit, petrol koku veya kok kömürü tozu kullanılır.

b) Anot yatağı direnci

Katodik koruma sistemlerinde anot yatağı direncinin mümkün olduğunca küçük olmasına çalışılır. Anot yatağı direncinin yüksek oluşu, katodik koruma akımının daha yüksek bir potansiyel ile uygulanmasına neden olur. Yüksek potansiyel akım maliyetini artırır. Anot yatağı direncini azaltmak için aşağıdaki önlemler alınabilir:

1. Anot çevresine kok tozu konularak anot boyutları artırılır.
2. Anot yatağı düşük rezistiviteli bir zemin içinde açılır.
3. Anot sayısı artırılır. Ancak bu durumda maliyette de artış olur.
4. Paralel bağlanmış anotlar arasındaki mesafe artırılır.
5. Büyük anot yerine aynı kütlerde fakat daha küçük boyutlu anotlar kullanılır. Böylece katodik koruma ömrü değiştirilmeden anot yatağı direnci azaltılmış olur.
6. Boy/çap oranı daha büyük olan anotlar tercih edilir.

Anot yatağı direncinin kaçta düşürülmesinin uygun olacağı söz konusu katodik koruma sisteminin akım ihtiyacı göz önüne alınarak belirlenir. Eğer akım ihtiyacı küçük ise, bu durumda maliyeti artırıcı önlemlerle anot yatağı direncinin düşürülmesine gerek yoktur. Ekonomik bir çözüm için Şekil 5.8'de verilen grafik kullanılabilir (Baeckmann, 1983).



Şekil 5.8 Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde anot yatağı direncinin belirlenmesi

Şekilden görüldüğü üzere, katodik koruma akım ihtiyacının 2 Amperden daha az olması halinde , anot yatağı direnci 5,0 Ohm veya daha fazla seçilebilir. Fakat katodik koruma akım ihtiyacı 5 Amper veya daha fazla ise, bu durumda anot yatağı direncinin $R < 2,0$ Ohm olması istenir. Örneğin anot yatağından 15 A akım çekilecek ise, grafiğe göre $R < 1,6$ Ohm olması gerekir. Böylece doğru akım voltajı $E < 25$ Volt olacaktır. Bu grafik $\rho = 10000$ Ohm.cm zemin rezistivitesi içindir. Daha küçük zemin rezistiviteleri için $F = \sqrt{\frac{\rho}{10000}}$ faktörü kullanılmalıdır. Buna göre 3000 Ohm.cm rezistiviteli bir zemin içinde açılacak olan bir anot yatağından eğer 15 A akım çekilecek ise, anot yatağı direncinin $R = 1,6 \sqrt{\frac{3000}{10000}} = 0,88$ Ohm' a düşürülmesi gerekir.

c) Anot sayısı

Yukarda açıklanmış olduğu gibi, anot sayısı artırıldıkça direnç düşer, buna karşılık maliyet artar. Anot sayısı katodik koruma akım ihtiyacına ve söz konusu olan zeminin rezistivitesine bağlıdır. Zemin rezistivitesi arttıkça, aynı akımı çekebilmek için daha fazla anot kullanmak gerekir.

d) Tek anot direnci

Anot yatağı direncini belirlemek için her şeyden önce zemin içinde bulunan tek anot direncinin hesaplanması gerekir. Anotlar yeraltına dikey veya yatay olarak konulur. Anot direnci, anodun dikey veya yatay konumunda bulunmasına göre birbirinden farklıdır. Yeraltına dik olarak konulan anotların direnci yatay olarak konulan anotlara göre daha büyüktür. Tek anot direnci H.B.Dwight formülleri ile hesaplanabilir. Yeraltına dikey ve yatay olarak yerleştirilmiş olan silindir biçimli anotların direncinin hesaplanmasında (5.7) ve (5.8) eşitliklerinin aynısı kullanılır (Shepard ve Graeser, 1950).

Bu bağıntılar $L / d > 5$ olan silindir biçimli veya çubuk şeklindeki anotlar için kullanılır. Dairesel kesitli olmayan anotların efektif yarı çapı (r) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$r = \sqrt{\frac{\text{Kesit alanı}}{\pi}} \quad (5.18)$$

Yukarda tanımlandığı şekilde (5.7) eşitliği kullanılarak $\rho = 1000 \text{ Ohm.cm}$ olan bir zemin içine dik olarak konulan 5 cm çapında ve 150 cm boyunda bir demir silikon anodun direnci şöyle hesaplanır.

$$R = \frac{1000}{6,28 \times 210} \left(\ln \frac{8 \times 210}{20} - 1 \right) = 2,60 \text{ Ohm}$$

Bu direnç, anot yatağından zemine geçiş direncidir. Buna ek olarak anot metalinden anot dolgusuna geçiş direncinin de (anot iç direnci) hesap edilmesi gerekir.

$$R_{iç} = \frac{50}{6,28 \times 150} \left(\ln \frac{8 \times 150}{5} - 1 \right) = 0,24 \text{ Ohm}$$

Anot toplam direnci $= 2,60 + 0,24 = 2,84 \text{ Ohm}$ bulunur.

Aynı anodun yatay olarak yeraltına konulması halindeki direnci (5.8) eşitliği kullanılarak benzer şekilde hesaplanacak olursa, $R = 2,08 + 0,20 = 2,28 \text{ Ohm}$ bulunur.

5.3.4.1. Sığ anot yatakları

Anot yatağı direncini düşürmek ve maliyeti azaltmak için paralel bağlanmış çok sayıda anot, bir anot yatağı içinde bir arada kullanılır. Anotlar yatak içine düzgün aralıklarla yatay olarak veya dikey olarak konulabilir.

a) Anot yatağı direnci

(n) adet anodun birbirinden (s) m aralıklarla paralel olarak bağlanması halinde anot yatağı toplam direnci (5.12) eşitliğindeki gibi hesaplanır. Eğer anotlar arasındaki mesafe çok büyük ise, (örneğin $s > 10 \text{ m}$) anotların birbiri üzerine olan interferans etkisi ihmal edilebilir. (Formülde parantez içindeki üçüncü terim sıfır kabul edilebilir.) Bu durumda paralel bağlanmış R_0 direncindeki (n) adet anodun toplam direnci, $R = R_0 / n$ bağıntısı ile hesap edilebilir. Ancak anot yatağı için boş arazi bulunsa bile, anotlar arasında bu kadar fazla aralık bırakılması anot kablosu maliyetini ve hafriyatı artırdığı için ekonomik olmaz. Pratikte anotlar arası mesafe genellikle 5 m veya daha küçük olarak seçilir.

b) Sığ anot yataklarında interferans

Anot yatağının yakın çevresinde zemin potansiyelinde artış olur. Eğer anot yatağı yakınında yabancı bir metalik yapı bulunuyorsa, akım bu yapıya girerek bu yapı üzerinde korozyona neden olur. Anot yatağından çevreye akım kaçığının önlenmesi için anot yatağı projelendirilmesinde bazı önlemlerin alınması gerekir. Amaç anot yatağından belli bir uzaklıkta zemin içinde potansiyel değişimini belli bir değerin altında tutabilmektir.

5.3.4.2. Derinkuyu anot yatakları

Yukarda açıklandığı üzere sığ anot yataklarında anotlar yaklaşık 2 m derinlikte kok tozu yatağı içine yatay veya dikey konumda yerleştirilmektedir. Derin kuyu anot yataklarında ise, anotlar yeterli derinlikte (en az 15 m) bir kuyu içine dikey olarak sallandırılıp, gerekirse kuyu içine kok tozu doldurulmaktadır. Sığ anot yataklarının hem maliyetleri düşük, hem de montajı basit ve kolaydır. Buna rağmen birçok yerde aşağıda belirtilen avantajlarından dolayı derin kuyu anot yatağı tercih edilmektedir.

1- Sığ anot yatağı için geniş bir alana ihtiyaç vardır. Anot yatağı yapılmış bir arazinin başka amaçlarla kullanılması da mümkün değildir. Özellikle kent içlerinde boş arazi bulunamadığı için, dere ve kayalık bölgelerde de topoğrafik zorluklar nedeniyle sığ anot yatağı yerine derin kuyu anot yatağı tercih edilmektedir.

2- Zemin rezistivitesinin çok yüksek olması halinde anot yatağı direncini istenilen düzeye düşürebilmek güçleşmektedir. Bu sorun derin kuyu anot yatakları ile daha kolay çözülmektedir. Derin kuyu içindeki anotlar mevsimsel meteorolojik olaylardan da etkilenmemektedir.

3- Derin kuyu anotlardan daha uniform bir akım dağılımı sağlanabilmekte ve zemin yüzeyinde daha düşük bir potansiyel farkı oluşmaktadır. Bu nedenle derin kuyu anotların çevre metalik yapılar üzerine anodik interferans etkisi daha az olmaktadır.

Bu avantajlar yanında derin kuyu anot yataklarının başlıca dezavantajları da şöyle sıralanabilir.

1- Derin kuyu anot yataklarının yapım ve montaj maliyeti, eşdeğer akım üreten sığ anot yataklarına göre daha yüksektir.

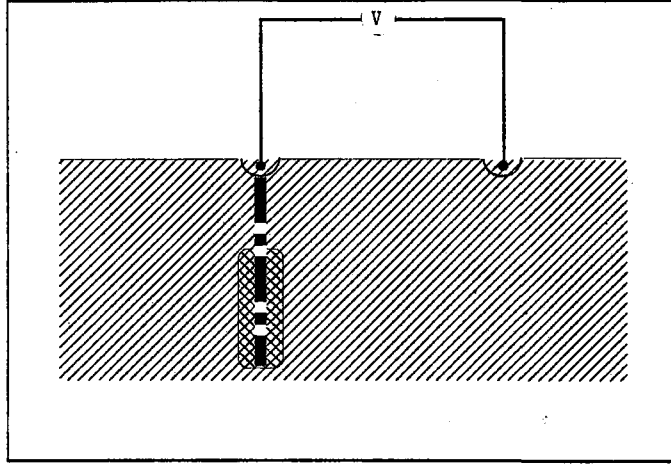
2- Anot yatağı dolgu malzemesi olarak kullanılan kok tozunun kuyu içine, boşluksuz olarak doldurulması oldukça güçtür. Boşluk kalması halinde anot direnci artmaktadır. Diğer taraftan anot reaksiyonları sonucu oluşan gazların dışarı atılması da sorun yaratmaktadır. Kuyu içine ayrı bir havalandırma borusu konularak oluşan gazların uzaklaştırılması yoluna gidilmektedir.

a) Derin kuyu anot yataklarının özellikleri

Anot yatağının temel görevi, istenilen şiddette doğru akımı belli bir potansiyel düzeyinde zemin içine yaymaktır. Bunu sağlayabilmek için anot yatağı direncinin mümkün olduğunca düşük olması ve bunun zamanla artmaması gerekir. Anot yatağı direnci, kuyunun boyuna, çapına, dolgu maddesinin rezistivitesine, anot cinsi ve sayısına ve özellikle çevre zeminin özgül elektrik direncine bağlıdır. Bu sonuncu özellik anot yatağı yeri seçilirken mutlaka göz önüne alınmalıdır. Kuyu açılmadan önce söz konusu bölgenin hidrolojisi, litolojisi ve zeminin jeolojik yapısı incelenmelidir. Wenner dört elektrot yöntemi ile ancak belli bir derinliğe kadar (genellikle yüzeydeki toprak tabakasının) anlamlı rezistivite ölçümleri yapılabilir. Derin kuyu çok sayıda jeolojik tabakadan geçebilir. Bu nedenle kuyuyu karakterize eden gerçek rezistivite değeri ancak kuyu açıldıktan sonra elde edilebilir.

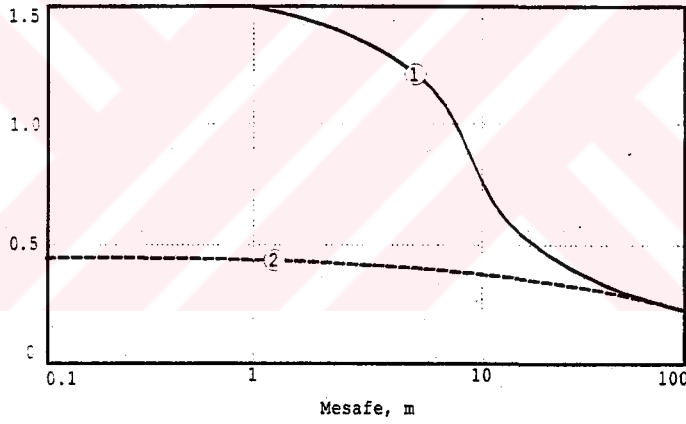
Anot yatağı için açılacak olan kuyunun derinliği, çekilecek akım şiddetine yani kuyu içine yerleştirilecek anot sayısı ve büyüklüğüne bağlıdır. Kuyunun yüzeyden itibaren belli bir derinliğe kadar olan bölgesine anot konulması uygun değildir. Anotların yüzeye yakın olarak konulması halinde anot çevresinde aşırı bir potansiyel artışı görülür. Yüzeyde potansiyel artışının 200 mV dan fazla olmaması için, anotların kuyu içine yüzeyden itibaren en az 15 m derinliğe konulması gerekir. Kuyu içinde hiç inaktif bölge bırakmadan yüzeyden itibaren anot konulması halinde, anot yatağı civarında yüzeyde (+) yönde aşırı potansiyel artışları gözlenir. Zemindeki potansiyel değişimi, iki Cu/CuSO₄ referans elektrot yardımı ile yüzeyde ölçülebilir (Şekil 5.9) (Yalçın ve Koç, 1998).

Yüzeyde oluşan potansiyel değişimi sıg anot yataklarında 5 Volta kadar yükselebilir. Derin kuyu anot yataklarında kuyunun inaktif bölgesi artırılarak yüzeyde oluşan potansiyel artışları azaltılabilir.



Şekil 5.9 İki referans elektrot yardımıyla anot yatağı üzerinde oluşan potansiyel farkının ölçülmesi

İnaktif bölge uzunluğuna göre kuyu çevresinde oluşan potansiyel değişimi Şekil 5.10'da görülmektedir(Uhlig, 1971).



Şekil 5.10 İnaktif bölge derinliğinin yüzeydeki potansiyel farkına etkisi

İnaktif bölge derinliği : (1) $t=10$ m, (2) $t=50$ m

Zemin yüzeyinde oluşacak potansiyel farkı, $\Delta E = i \rho / 2 \pi r$ bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada,

i : Anottan çekilen akım (Amper)

ρ : Zemin rezistivitesi (Ohm.cm)

r : Anot yatağı eksenine olan uzaklık (cm)

ΔE : (r)cm uzaklıktaki potansiyel farkı (Volt)' dir.

Anot yatağı çevresinde küre biçiminde potansiyel gradienti oluşur. Bu nedenle anotlar ne kadar derine konulursa yüzeyde oluşacak potansiyel değişimi o derece azaltılmış olur.

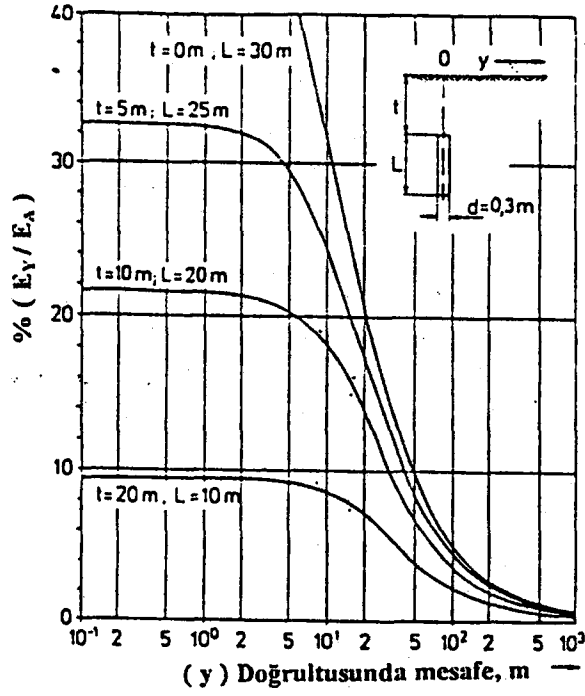
b) Derinkuyu tipleri ve anotların montajı

Derin kuyu anot yatakları en az 20 cm çapında açılır. Kuyuların açılmasında hava basınçlı veya sulu sondaj makinaları kullanılır. Kuyu zemini kendini tutabilecek sertlikte ise ayrıca muhafaza borusu kullanılmasına gerek yoktur. Aksi halde aktif bölgede delikli filtre borusu olmak üzere kuyu içine muhafaza borusu yerleştirilmesi gerekir. Her iki halde, derin kuyunun inaktif bölgesine çelik muhafaza borusu konulması faydalıdır. Anot yerleştirme bölgesinde filtre borusu bulunması halinde anot direncinde artış meydana gelir. Bu bölgedeki muhafaza borusunun delik açıklığı %30 dan az olmamalıdır. Bu durumda bile anot direncinde yaklaşık %25 oranında artış görülür.

Derin kuyunun inaktif bölgesinin uzunluğu anot yatağı direncine etki yapmaz. Anot yatağı direnci kuyu aktif bölgesinin boyuna, çapına, dolgu maddesinin ve çevre zeminin resistivitesine bağlıdır. Kuyu içine konulan anot cinsi ve sayısı da anot direncine ve polarizasyonuna etki yapar. Özellikle anot reaksiyonu sonucu oluşan gazların dışarı atılamaması halinde anot direncinde büyük artışlar meydana gelir. Bir derin kuyu anot yatağının performansı, derin kuyu içine anotların ve dolgu maddelerinin doldurulması işleminden büyük ölçüde etkilenir. Amaç, anotları kuyu içine sağlam şekilde yerleştirmek ve dolgu malzemesinin boşluksuz olmasını sağlamaktır. Anotlar kuyu içine yerleştirilirken aşağıdaki genel kurallara uyulması gerekir.

c) Derin kuyu anot yatağı çevresinde interferans

Derin kuyu anot yataklarının çevre yapılar üzerine interferans etkisi sığ anot yataklarına göre daha azdır. Derin kuyu anot yataklarının interferans etkisi anot boyu (L) ile, derin kuyu üst kısmında bırakılan anotsuz inert bölgenin uzunluğu (t) ye bağlıdır. Şekil 5.11'da 30 cm çapında ve L m bolundaki bir derin kuyu anodun inert bölge derinliği $t = 0$ m , $t = 5$ m , $t = 10$ m ve $t = 20$ m iken, anot yatağından (y) m uzaklıkta zemindeki potansiyel değişimi E_y / E_A oranları verilmektedir (Baeckmann, 1983).



Şekil 5.11 Bir derin kuyu anot yatağında zemin potansiyelinin anot boyuna ve inert bölge uzunluğuna bağlılığı

5.3.5 Derin kuyu ve sığ anot yataklarının karşılaştırılması

Eşdeğer akım çıkışı sağlayan derin kuyu anot yatakları, sığ (yatay) anot yataklarına göre yaklaşık % 20-25 oranında daha pahalıdır. Anot yatağından çekilecek akım şiddeti ve söz konusu olan zeminin rezistivitesi arttıkça her iki tip anot yatağı arasındaki maliyet farkında azalma olur.

5.4. Katodik Koruma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Teorik ilkeleri aynı olan katodik koruma sistemleri uygulamada birbirinden oldukça farklıdır. Bu iki sistemin hem teknik hem de ekonomik açıdan bazı avantaj ve dezavantajları vardır.

Galvanik anotlu katodik koruma sisteminin avantajları :

1. Dış akım kaynağına gerek yoktur. Bu sistem elektrik enerjisinin bulunmadığı yerlerde tek seçenektir.
2. Yapımı basit ve kolaydır. İşletme sırasında hiç bir ayarı gerektirmez. Çevre yapılar üzerinde interferans etkisi yapmaz.
3. Anot - katot arasındaki potansiyel farkı akım ihtiyacını karşılayacak ölçüde otomatik olarak ayarlanır.

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinin dezavantajları :

1. Akım maliyeti yüksektir. Bu nedenle yüksek akım ihtiyacının söz konusu olduğu hallerde tercih edilmez.
2. Galvanik anotların potansiyeli düşük olduğundan, yüksek rezistiviteli elektrolitler içinde etkili olamazlar.
3. İşletme sırasında herhangi bir nedenle katodik koruma akım ihtiyacında artış olursa, mevcut anotlar ile bunu karşılayabilmek mümkün olmaz. Yeni anotlar ilave edilmesi gerekir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin avantajları :

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

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinin dezavantajları:

1. Bu sistem elektrik akımı bulunmayan yerlerde uygulanamaz. Ancak son yıllarda, güneş enerjisinden fotovoltaiik pillerle elde edilen elektrik akımının katodik koruma sistemlerinde kullanılmasına başlanmıştır.
2. Anot yatağı yakınında bulunan yabancı metalik yapılar üzerinde interferans etkisi yaratmaktadır.
3. Yapıya akımın uygulandığı noktada aşırı potansiyel yükselmeleri görülebilir. Bu bölgede hidrojen çıkışı nedeniyle kabuk soyulması ve hidrojen kırılgenlığı olayları meydana gelebilir.

5.5. Katodik Koruma Kriterleri

Bir çelik 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 (BS7361, 1991; Morgan, 1985).

1) - 850 mV kriteri

Çelik yapının doygun bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen potansiyeli - 850 mV veya daha negatif bir değere düşürülmüş olmalıdır. Bu değer yapıya yeterli bir süre akım uygulandıktan sonra ve yapı akım altında iken ölçülür. Bu nedenle IR omik potansiyel düşüşünün de göz önüne alınması gerekir. -850 mV değeri ampirik olarak belirlenmiş olmasına rağmen elektrokimyasal olarak demirin elektrot potansiyeli hesaplanarak aşağıdaki şekilde elde edilebilir. Demirin sulu çözeltiler içindeki korozyon reaksiyonu göz önüne alınarak Nernst Denklemi ile potansiyel değeri hesaplanabilir.



$$E = E_0 + RT / nF \ln a_i \quad (5.20)$$

$$E_{\text{Fe/Fe}^{2+}} = -0,44 + (0,059/2) \log [\text{Fe}^{2+}] \quad (5.21)$$

Korozyon sonucu ortaya çıkan demir iyonu, demir hidroksitin çözünürlüğü ile sınırlıdır. Nötr ortamlarda demir iyonu konsantrasyonu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.



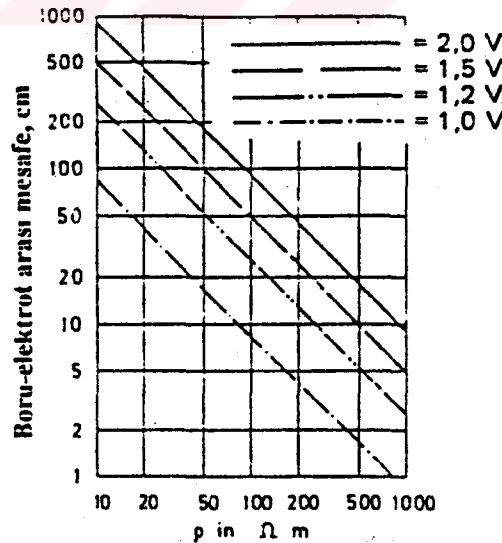
$$\text{Ç} = [\text{Fe}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = 1,8 \cdot 10^{-15} \quad (5.23)$$

Buradan demir iyonu konsantrasyonu $[\text{Fe}^{2+}] = 1,9 \cdot 10^{-5}$ bulunur. Eğer demir korozyona uğramıyorsa demir iyonu konsantrasyonu bu değerden daha küçük olmalıdır. Bu değer Nernst denkleminde yerine konularak korozyon için limit potansiyel değeri $E_{\text{Fe/Fe}^{2+}} = -0,57$ Volt bulunur. Demirin potansiyeli bu limit değerden daha negatif hale getirilirse, korozyon söz konusu olmaz. Bu potansiyel hidrojen skalası içindir. Bakır / bakır sülfat referans elektroduna göre -0,890 V ' a karşı gelir. Pratikte bu değer - 0,85 Volt olarak kullanılmaktadır. Kolaylığı nedeniyle pratikte genellikle - 850 mV kriteri kullanılmaktadır. Buna göre korunmakta olan çelik yapının doygun bakır / bakır sülfat referans elektroduna 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. Bu nedenle ölçüm devresinde oluşan IR omik potansiyel düşüşünün de göz önüne alınarak düzeltme

yapılması gerekir. Bu durum, -850 mV kriterinin gerçeklere tam olarak uymadığı konusunda kuşklar yaratır. Özellikle yüksek rezistiviteli zeminlerde (IR) potansiyel düşüşünden kaynaklanan potansiyel farkının 200 - 300 mV' a ulaşması söz konusudur. Bu durumda zemin yüzeyine konulan referans elektrot ile ölçülen boru / zemin potansiyeli güvenilir olmaktan çıkmaktadır. Boru yüzeyinde -900 mV olan potansiyel , zemin üstündeki referans elektrot ile yapılan ölçümde - 1,2 Volt olarak okunmaktadır.

Pratikte referans elektrodun yeraltında bulunan borunun yüzeyine konulması mümkün olmamakta ve ölçümler şekilde görüldüğü gibi boru hattının üzerinde yer yüzünde ve yaklaşık olarak 1m uzaklıktaki referans elektrot ile yapılmaktadır. Bu durumda , - 850 mV kriterinin sağlanması için uzaktan ölçülen potansiyel değerinin daha yüksek olması gerekmektedir. Bu değer, boru ile referans elektrodun konulduğu nokta arasındaki mesafeye ve zeminin rezistivitesine göre değişmektedir. Boru yüzeyinde potansiyel değerinin - 850 mV olması için, yer yüzünden ölçülen boru zemin potansiyel değerinin kaç olması gerektiği Şekil 5.12 'de grafikler halinde verilmektedir (Baeckmann, 1983).

Örneğin, $\rho = 5000 \text{ Ohm.cm}$ olan bir zemin içinde bulunan bir boruda -850 mV koruma potansiyelini tutturabilmek için, boru yüzeyi ile referans elektrot arasında 50 cm mesafe varsa voltmetrede en az - 1,2 Volt, 100 cm mesafe varsa en az - 1,5 Volt okunmalıdır.



Şekil 5.12 Boru/zemin potansiyelinin boru yüzeyi ile referans elektrodun konulmuş olduğu mesafeye ve zemin rezistivitesine göre değişimi

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 kriter de akım altında yapılan ölçüme dayanmış olduğundan IR omik potansiyel düşüşü söz konusudur. 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) 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. Bu ölçümde IR omik düşüşü bulunmaz. Teorik yönden en güvenilir kriter budur.

4) Tafel bölgesi başlama noktası

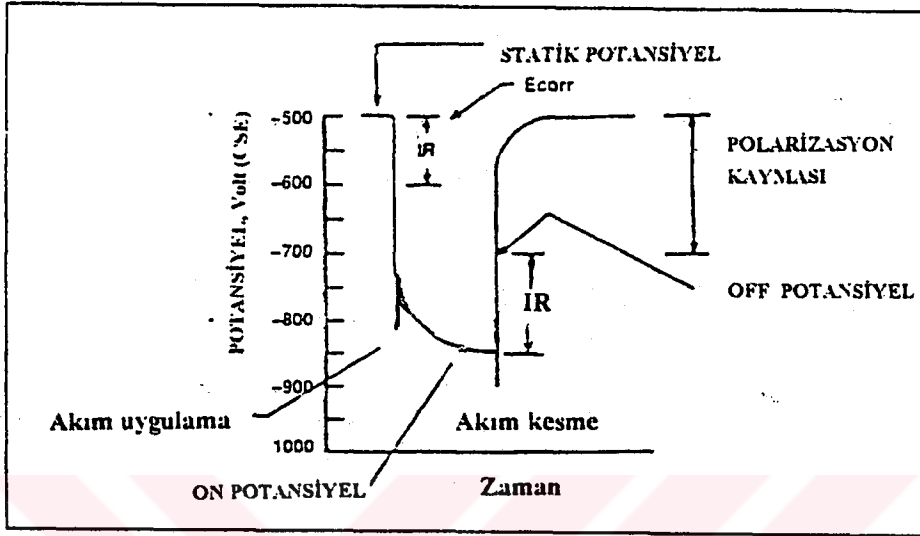
Katodik korumanın gerçekleşmiş olduğu potansiyel ($E-\log i$) grafiği çizilerek Tafel lineer bölgesinin başlamış olduğu noktaya karşı gelen potansiyel olarak belirlenebilir. Bilimsel temeli çok sağlam olan bu kriteri arazi koşullarında uygulamak son derece güçtür.

Pratikte kolaylığı bakımından birinci kriter tercih edilmektedir. Ancak burada IR omik düşüşünün elimine edilmesi zorunludur. Diğer taraftan bu kriter ancak nötral veya nötrale yakın pH derecelerinde ve yüksek olmayan sıcaklıklarda güvenilir sonuçlar verebilir. Omik düşüş etkisi bulunmayışı nedeniyle - 100 mV 'luk polarizasyon kayması değeri daha güvenilir bir kriterdir. $E-\log i$ ölçümleri ile hem minimum koruma akım ihtiyacı, hem de koruma potansiyeli belirlenebilir. Ancak bir laboratuvar deneyi olan bu deneyi arazide gerçekleştirmek bir çok güçlük yaratır (Smith, 1993).

5.5.1 Katodik koruma kriterlerinin güvenilirliği

Yukarda açıklanan katodik koruma kriterlerinin ne derece güvenilir olduğunu bir örnek üzerinde açıklayalım. Doygun bakır/bakır sülfat referans elektroduna göre ölçülen statik potansiyeli -500 mV olan bir çelik boruya katodik yönde akım uygulandıktan belli bir süre

sonra boru/zemin potansiyeli -850 mV 'a düşürülmüş olsun (Şekil 5.13) (Baeckmann, 1983). Şekil 6.13'de akım altında $E_{on} = -850$ mV ölçülmektedir. Potansiyel kayması, $\Delta E = E_{on} - E_o > 300$ mV olduğuna göre 300 mV olan potansiyel kayması koşulu sağlanmış olmaktadır.



Şekil 5.13 Katodik koruma potansiyel kriterleri

Ancak E_{on} potansiyeli içinde IR omik düşüşünün etkisi olduğu gözden uzak tutulmamalıdır. Akım kesildikten hemen sonra ölçülen E_{off} potansiyeli ($IR = 0$) ile elde edilen polarizasyon kayması $\Delta E = E_{off} - E_o > 100$ mV olduğuna göre 100 V luk polarizasyon kayması kriteri de sağlanmış olmaktadır.

5.6. Katodik Koruma Akım İhtiyacı

Katodik koruma projelendirmesi yapılmadan önce akım ihtiyacının ya deneysel olarak, ya da literatürde çeşitli ortamlar için verilmiş olan listelerden alınarak belirlenmesi gerekir. Katodik koruma sisteminin transformatör / redresör kapasitesi, tesis ömrü ,anot kütlesi ve sayısı proje koşulları için ön görülen akım ihtiyacı değerine göre hesaplanır (Gartland, 1983). Çeliğin kaplamalı ve kaplamasız olarak çeşitli ortamlarda korunması için gerekli olan yaklaşık akım ihtiyacı değerleri literatürde listeler halinde verilmiştir. Zemin içinde bulunan bir boru hattının akım ihtiyacı büyük ölçüde kaplama kalitesine ve direncine bağlıdır. Boru hattının içinde bulunduğu zeminin rezistivitesi de etkili olmakla beraber

zemin direnci boru kaplama direnci yanında çok küçük kaldığından ihmal edilebilir. Bir fikir vermek üzere, Çizelge 5.2’de bazı ortamlar için Çizelge 5.3’ ve Şekil 5.14’de de değişik kaplama cinsleri için akım ihtiyacı değerleri verilmektedir.

Çizelge 5.2 Katodik koruma için yaklaşık akım ihtiyacı değerleri

Ortam Koşulları	Yaklaşık akım ihtiyacı, 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

Çizelge 5.3 Çeşitli cins kaplamalı boru hatlarının kaplama direnci ve akım ihtiyacı

Kaplama kalitesi	Kaplama direnci, ohm.m ²	Akım ihtiyacı, mA / m ²
Çok zayıf	100 -200	1,0 -2,0
Zayıf	200 -500	0,5 -1,0
Orta	500 -1000	0,1 -0,5
İyi	1000 -2000	0,05 -0,1
Çok iyi	2000 -10000	0,01 - 0,05
Mükemmel	> 10000	0,01 >

ZEMİN

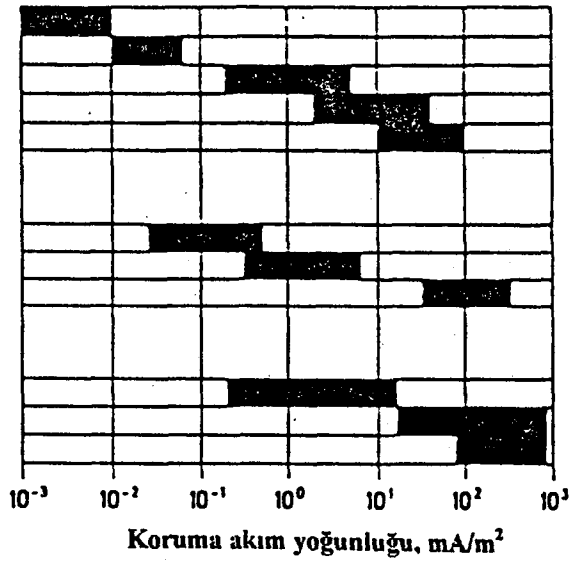
Polietilen kaplama
Çift kat sargılı bitüm
Tek kat sargılı bitüm
Jüt sargılı bitüm
Kaplamaşız

TATLI SU

İyi kaplamalar
Eski kaplamalar
Kaplamaşız

DENİZ SUYU

İyi kaplamalar
Eski kaplamalar
Kaplamaşız



Şekil 5.14 Çeşitli cins kaplamalara ait yaklaşık akım ihtiyacı değerleri (Baecmann, 1983)

Bir fikir vermek amacıyla literatürde verilmiş olan bu değerlerin doğrudan projelerde kullanılması sakıncalıdır. Bu değerleri kullanırken proje mühendisi aşağıdaki iki hususu göz önünde bulundurmalıdır.

1. Akım ihtiyacı değerleri listelerde çok geniş aralıklarla verilmiştir. Bu değerlerden en düşük olanının kullanılması emniyet açısından, en büyük değer kullanılması da ekonomik açıdan sakıncalı olabilir.
2. Kaplama cinsine göre verilmiş olan akım ihtiyacı değerlerinde, kaplamanın kalitesi ve işçilik hataları göz önüne alınmamıştır. Özellikle boruların taşınması, depolanması, hendeklere yerleştirilmesi ve kaynak bölgelerinin izolasyonu sırasında ortaya çıkacak hataların etkileri göz önüne alınarak akım ihtiyacında hesaba katılması gerekir.

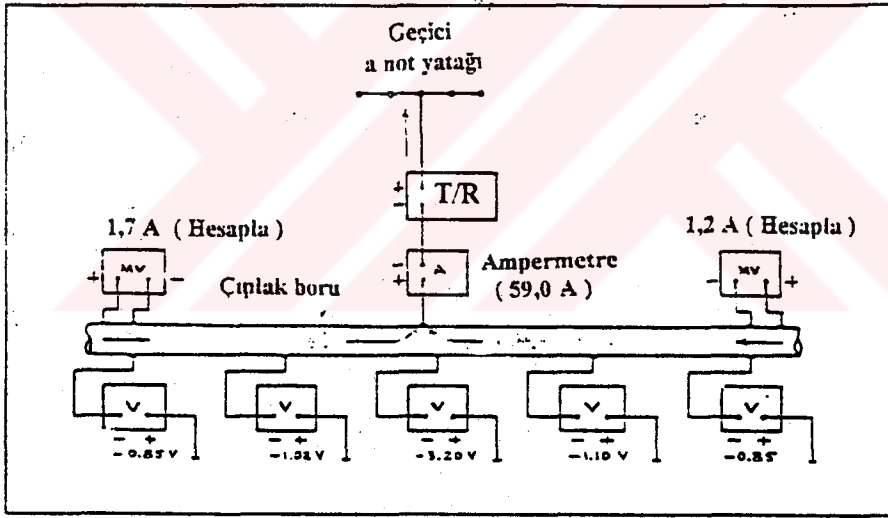
Projelendirme sırasında akım ihtiyacı belirlenirken tablolarda verilmiş olan bu akım ihtiyacı değerlerinin, katodik koruma ilk uygulandığında gerekli olan ve metal yüzeyi polarize olmadan önceki akım ihtiyacı olduğu gözden uzak tutulmamalıdır. Polarizasyon gerçekleşikten sonra akım ihtiyacında önemli ölçülerde düşüş görülür. Buna karşılık kaplama direnci de zamanla azalacağından akım ihtiyacında artış meydana gelir. Proje mühendisi bu çelişik durumu değerlendirerek, katodik koruma süresi içinde geçerli olan ortalama bir akım ihtiyacı değerini belirlemek durumundadır. Tablolarda verilen bütün bu akım ihtiyacı değerleri proje mühendisine yaklaşık bir fikir vermek içindir. Katodik

koruma akım ihtiyacının belirlenmesinde en güvenilir değerler gerçek ortamlarda yapılan akım ihtiyacı deneyleri ile elde edilebilir (Mollan ve Aliassen, 1984).

5.6.1 Akım ihtiyacı deneyleri

Yeraltına konulmuş olan boru hatlarının bulundukları zemin içindeki akım ihtiyacını belirlemek için bir çok deney yöntemi geliştirilmiştir. Kaplamasız bir boru hattının akım ihtiyacını tayin için Şekil.5.15’de verilen deney düzeneği kullanılabilir (Peabody, 1967).

Deney şöyle yapılır. Boru hattına en az 30 m uzaklıkta geçici bir anot yatağı oluşturulur. Bir doğru akım kaynağından yeterli şiddette akım uygulanarak boru hattının belli bir bölgesi katodik olarak polarize edilir. Öyle ki, ölçüm yapılan en uç noktalarda boru /zemin potansiyeli doygun bakır/ bakır sülfat referans elektroduna karşı - 0,85 Volt değerine erişmiş olsun. Bu potansiyel değerine erişmek için başlangıçta yüksek bir akım şiddeti uygulanması gerekir.



Şekil 5.15 Çıplak bir boru hattında akım ihtiyacının tayini deneyi

Boru/zemin potansiyelini -0,85 Volt ' ta tutabilmek için uygulanması gereken akım şiddeti zamanla gittikçe azalır. Belli bir süre sonra sistem kararlı hale gelir ve uygulanan akım artık değişmez. Çıplak bir boru hattında kararlı bir polarizasyona ulaşmak için günlerce akım uygulanması gerekebilir. Kararlı hale erişildiğinde boru hattına uygulanan akım şiddeti kaydedilir. Ayrıca boru hattı boyunca değişik noktalarda boru/zemin potansiyeli ölçülür. Katodik korumanın gerçekleşmiş olduğu uç noktalarda , sistem kararlı

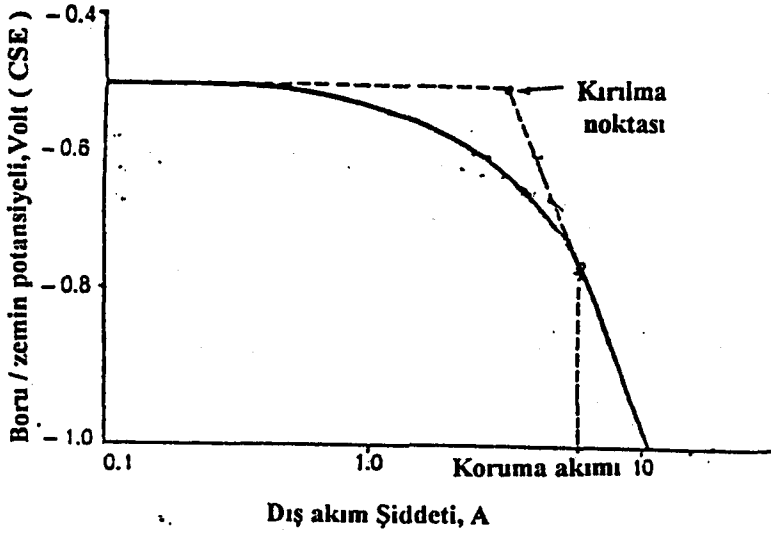
halde iken boru akımı ölçümleri yapılır. Deneye tabi tutulan (x) m uzunluğundaki boru parçasını katodik olarak polarize etmek için gerekli olan akım şiddeti, akım kaynağından boru hattına uygulanan dış akım ile uç noktadaki boru akımı arasındaki farka eşittir.

Şekilde yapılan deneyde boru hattına orta noktadan (2x) m boru parçası için 59 Amper akım uygulanmıştır. Bir yöne doğru akan akım $59/2 = 29,5$ A dır. Boru uç noktasında ölçülen boru akımı ise 1,2 A dir. Bu durumda (x) m uzunluğundaki boru parçasını katodik olarak korumak için harcanan akım , $i_K = 29,5 - 1,2 = 28,3$ A dir. (x) m uzunluğundaki boru hattının dış yüzey alanı bilindiğine göre, buradan mA/m² olarak akım ihtiyacı hesaplanır.

Çıplak boru hatlarının akım ihtiyacı çok yüksek olduğundan, bu deney ancak 100 - 200 m uzunluğunda bir boru parçası üzerinde yapılabilir. Çıplak boruların yaklaşık olarak 20-30 mA/m² akım çekeceği göz önüne alınırsa, (başlangıçta bu değer daha da yüksektir) 200 m uzunluğunda ve 40 cm çapında bir boru hattı için en az 7,5 - 10 A akıma ihtiyaç duyulur. Ayrıca geçici anot yatağı direnci de yüksek olacağından oldukça yüksek potansiyelli bir doğru akım gerekecektir.

5.6.1.1. Polarizasyon kırılma yöntemi ile akım ihtiyacı tayini

Teorik ilkeleri daha önce açıklanmış olan polarizasyon kırılma yöntemi, esas olarak bir laboratuvar metodu olmasına rağmen, uygun koşulların sağlanması halinde katodik koruma akım ihtiyacını belirlemek amacıyla arazide de uygulanabilir. Bu amaçla yüzey alanı belli olan ve iki ucundan izole edilmiş bulunan bir boru parçasına bir dış akım uygulanarak, akım yoğunluğuna karşı gelen potansiyel değerleri okunur. Elde edilen bu değerler ile $E - \log i$ grafiği çizilir. Böylece elde edilen polarizasyon eğrisinin lineer olan Tafel bölgesi korozyon potansiyeline ekstrapole edilir. Kesim noktası korozyon hızını verir. Katodik korumanın tam olarak gerçekleşmesi için korozyon hızından daha büyük bir akımın uygulanması gerekir. Bunun için polarizasyon eğrisindeki lineer bölgenin başlamış olduğu noktaya karşı gelen akım şiddeti (i_K) katodik koruma akım ihtiyacı olarak alınır. Bu noktada, metal yüzeyinde bulunan bütün anodik akımların sıfır olduğu kabul edilir (Şekil 5.16) (Morgan, 1985).



Şekil 5.16 Polarizasyon kırılma yöntemi ile katodik koruma akım ihtiyacının belirlenmesi

Bu yöntem ile bulunan katodik koruma akım ihtiyacının gerçeğe yakın olması için, söz konusu borunun ve zeminin üniform yapıda olması gerekir. Yüksek rezistiviteli zeminler içinde düzgün bir polarizasyon eğrisi elde etmek mümkün olmaz. Bu yöntemin arazide uygulanması sırasında karşılaşılan diğer bir sorun da, anot yatağının ölçüm noktasına yakın olması halinde kendini gösterir. Bu durumda anodik etkiler nedeniyle katodik koruma akım ihtiyacı daha küçük bulunur.

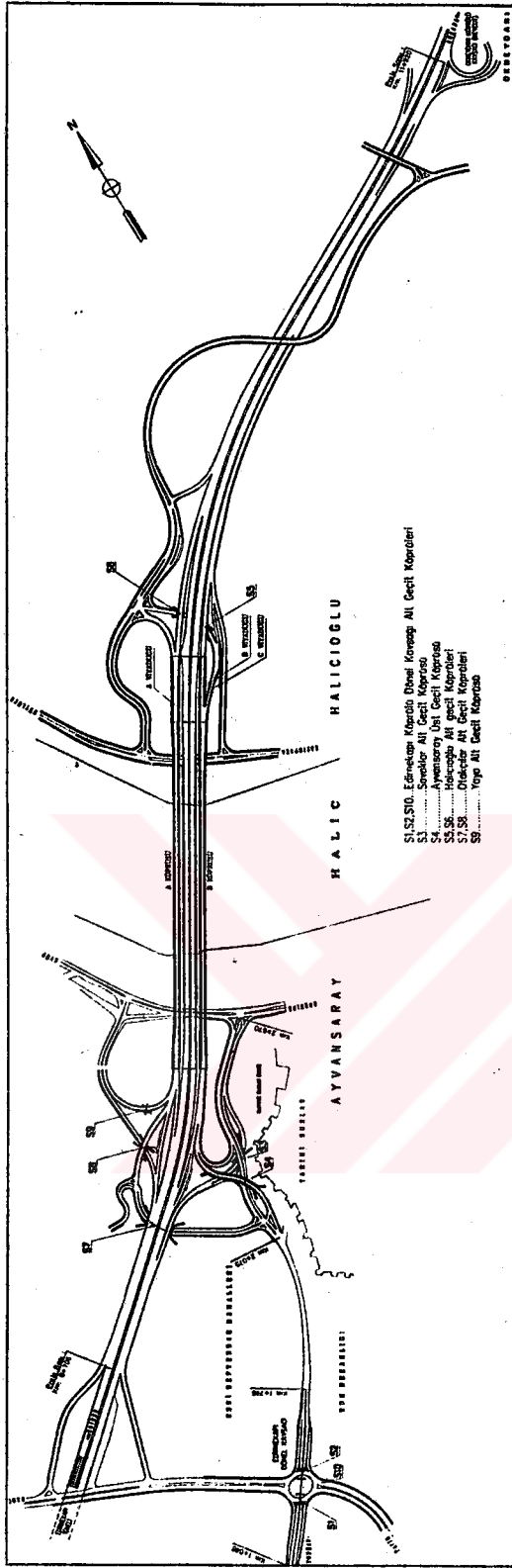
6. HALIÇ KÖPRÜSÜ ÇALIŞMA SAHASI KOROZİFLİĞİNİN İNCELENMESİ

6.1. Haliç ve Haliç Köprüsünün Tanıtılması

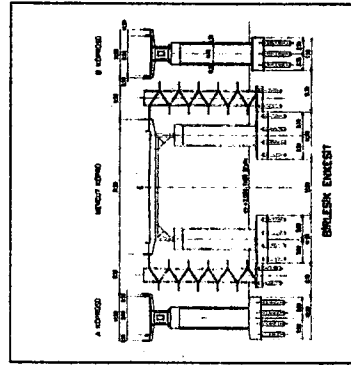
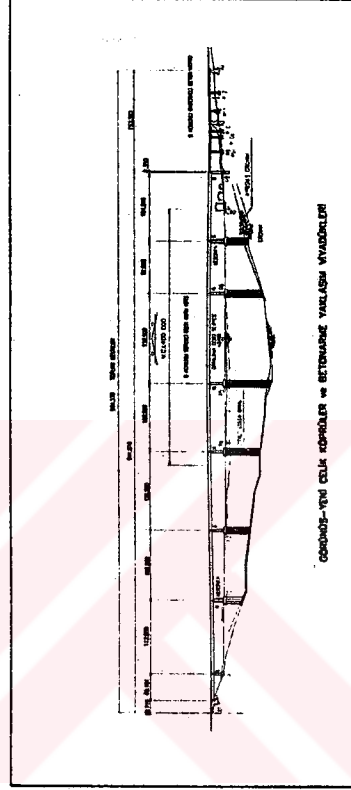
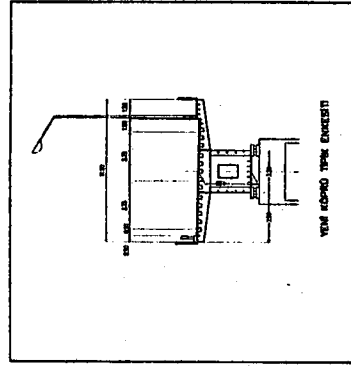
İstanbul Şehir içi karayolu ulaşımının en yoğun kesimi olan Haliçte mevcut köprünün her iki yanında inşa edilen çelik köprüler ve devamı olarak Edirnekapı Tüneli ile Okmeydanı Kavşağı arasındaki 1. Çevre yolu boyunca yapımı tamamlanan yeni yol bağlantıları Halıcıoğlu ve Ayvansaray yakalarındaki trafik dağılımını büyük ölçüde rahatlatacaktır. Tüm projenin genel görünüşü Şekil 6.1 ve 6.2’de görülmektedir(TCK,1996,1997)



Şekil 6.1 Haliç Köprüsünün genel görünüşü



Mevcut Yollar
 20 Ağustos 1995'te trafik açılan kısımlar.
 İnşaat devam eden kısımlar.



Şekil 6.2 Haliç Köprüsü Projesinin genel görünüşü

Halen mevcut köprüyü kullanarak bu tarihi su yolunu geçen trafik hacmi günde 160-180 bin araç seviyesine ulaşmıştır. 1974 yılında trafiğe açılan mevcut Haliç Köprüsü, kapasitenin zamanla bu talebi karşılamaktan çok uzak kalmasının yanı sıra, yapımından bu yana özellikle ticari trafik sayısındaki artış nedeniyle ön görülen dizayn değerlerinin üstündeki işletme yükleri altında hizmet vermiştir.

Yeni Haliç Projesi gerek uzun yıllar boyunca İstanbul'lular için ızdırap kaynağı olan Haliç'teki trafik tıkanıklığının ferahlatılması, gerekse mevcut köprünün yapısal takviyesi de dahil olmak üzere onarılarak gelecekteki ekonomik ömrünün güvenceye alınmasını amaçlamaktadır. Projenin devamında Edirnekapi hemzemin kavşağının köprülülük dönel kavşağı dönüştürülmesi sureti ile Topkapı-Okmeydanı arasındaki yoğun trafiğin de, yeni Çelik Köprülerden akıtılarak kesintisiz seyri sağlanacaktır. Proje bütünü ile 1998 sonunda tamamlanacaktır.

6.1.1. Haliç ve haliç köprüsünün tarihçesi

Antik çağda ve Bizans döneminde KHRYAOKERAS (Altın boynuz) olarak adlandırılan Haliç, İstanbul Avrupa yakasının güney giriş yakınında ve kentin en eski yerleşim çekirdekleri olan İstanbul ve Beyoğlu kesimleri arasındaki bir girintidir. Batı dillerinde Rumca adının çevirisiyle Altın Boynuz (Golden Horn-Goldenes Horn, Coren d'or) olarak adlandırılır. Boğaza eklenmiş boynuz biçiminde hafif bir yay oluşturan Haliç'in uzunluğu 8 Km. kadardır. Genişliği 200 m. (Eyüp-Hasköy) ile 700 m. (Kasımpaşa önleri) arasında değişir. Yukarı kesimlerde derinliği azdır. Boğaza yaklaştıkça artar.

Haliç, İstanbul palezoik kütlesini örten neojen üzerinde epijenik olarak ve büyük bir olasılıkla genç tektonik hatlar doğrultusunda kurulmuş olan Alibey ve Kağıthane derelerinin deniz altındaki bir uzantısıdır. Bu uzantı son buzullaşma döneminde (yık. 25 bin yıl önceleri) alçalan deniz düzeyine göre oyulmuş gömük vadilerin ortak aşağı çığırının, buzul dönemi sonrasında deniz düzeyinin yükselmesiyle (yık. 7000 yıl önce) Boğazla birlikte sular altında kalmış, böylece bir koy, jeomorfolojik deyimle bir ria oluşmuştur.

Derin, ulaşımaya elverişli, fırtınalardan korunmuş doğal bir liman olan Haliç'in kıyıları Eski çağdan başlayarak önem kazanmıştır. Balıkların zenginliğiyle de ünlü olan Haliç'in girişi Bizans döneminde bir zincirle kapatılarak, yüzyıllar boyunca buraya düşman gemilerin girişi önlenmiştir. 1453'te Osmanlı ordusu bu zincir yüzünden Haliç'e girememiş ve donanma kızaklarla karadan Kasımpaşa'ya indirilmiştir. Haliç Osmanlı döneminde savaş ve ticaret limanı olarak gelişmiştir. 16. yüzyılda Türk donanmasının ana üssü Gelibolu'dan Haliç'e taşınmış, Kasımpaşa Deresi önündeki koy, Türk gemi yapım sanayisinin merkezi olmuş ve yüzyıllar boyunca bu konumunu korumuştur. Osmanlı döneminde Haliç ve kıyıları, koruları, köşkleri, sarayları, yalıları ve sandal gezintileriyle kentin önemli yerleşim ve dinlenme merkezlerinden biri olmuştur. Kağıthane deresi Sadabat eğlenceleriyle ün kazanmıştır. Bartlett, Molling, Gouffier ve Allom'un resimlerinde Aynalıkavak Kasrı, Eyüp Sarayı, Sadabat Sarayı ve Kağıthane tüm görkemiyle görülmektedir.

Ancak bu durum son yüzyıl içinde kıyıların, zehirli atık sular boşaltan çeşitli sanayi kuruluşlarıyla ve altyapısız konutlarla kaplanması, çevredeki ilksel bitki örtüsünün yok edilmesi sonucu yamaçlarda ve özellikle Alibey ve Kağıthane derelerinin havzalarında erozyonun şiddetlenmesiyle büyük ölçüde değişmiş; Haliç hızla dolarak sıklaşan, kirlilikle birlikte yaşamsallığının yitiren bir su kitlesi haline gelmiştir. Yapılan araştırmalar Haliç'e yılda ortalama 263000 m³ katı maddenin taşındığını ve bunun sonucu tabanında yılda 10 cm kalınlığında bir çamur tabakasının biriktiğini ortaya koymuştur. Haliç'in yukarı kesimlerinde beşeri atıkların da biriktiği alüvyon adacıkları halinde su yüzeyine çıkmıştır. Sanayi kuruluşlarından ve kanalizasyonlardan boşalan atık sular Haliç'in hidrolojik özelliklerini de tahrip etmiştir. Çözülmüş oksijen içeriği büyük ölçüde azalmış, sularda ve dip çamurlarında yaşam için zararlı ağır metaller ve Hidrojen sülfür karışmıştır.

İstanbul'da Haliç üzerinde, Halıcıoğlu ve Ayvansaray'ı bağlayan mevcut Haliç Köprüsü, Boğaziçi Köprüsü ile ilgili çevre yolları projesi kapsamında, Karayolları Genel Müdürlüğü ile yine Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd. liderliğindeki bir konsorsiyum tarafından 15 Kasım 1971 ve 10 Eylül 1974 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Toplam uzunluğu 995 m olan bu köprünün dıştan dışa genişliği 31,20 m.dir ve denizden 22 m yüksektedir(TCK,1996).

6.1.2. Tüm inşaatın proje tanıtımı

Haliç Köprüsünün Onarımı ve Genişletilmesi projesi mevcut köprünün yanlarına yapılacak iki adet ikişer şeritli yeni çelik köprü ve devamı olan 1. Çevre yoluna bağlanacak yeni yol ve diğer bağlantılarla birlikte Haliç geçişi ve yerel trafiğin ferahlamasını amaçlayan bir projedir. Projenin toplam uzunluğu 4 km.dir. Bunun Okmeydanı köprülülük kavşağı ile Edirnekapı Tüneli arası genişleyen yolun uzunluğu 2270 mt. Edirnekapı köprülülük Kavşağı bağlantı yolu ise 1500 metredir.

Haliç Köprüsünün Onarılması ve Genişletilmesi projesi, mevcut köprüde yapılacak onarımlar da dahil olmak üzere; beton ayaklar üzerine oturan ve 8 açıklıktan oluşan $822 \times 2 = 1644$ mt. uzunluğunda 2 adet Çelik Köprü, çelik köprülerle anayol bağlantılarını teşkil eden toplam 363 mt. uzunluğunda 3 adet betonarme Yaklaşım Viyadüğü, 100 mt. uzunluğunda 1 adet betonarme Üst Geçit Köprüsü, bağlantı kolları üzerinde yer alan toplam 236 m. uzunluğunda 8 adet betonarme Alt Geçit Köprüsü, muhtelif yerlerde ve ebatlarda toplam 1530 m. uzunluğunda istinat duvarı ile 104 mt. Kutu Menfez ve 480 mt. Boru Menfez yapımını kapsamaktadır.

6.1.3. Güzergah tanıtımı

Proje kapsamında teşkil edilecek anayol güzergahı her iki istikamette olmak üzere ve artan km. yönünde Ayvansaray tarafta 1. çevre yoluna bağlandığı km: 8+706'dan başlayarak km: 9+389'da yeni çelik köprülere ulaşmakta ve Haliç'i katederek Halıcioğlu tarafındaki yaklaşım viyadükleri sonu olan km: 10+364'ten itibaren Okmeydanı kavşak mevkiinde gene 1. çevre yoluna irtibatlanacağı km:11+718'de son bulmaktadır. Yaklaşık 3,0 km. uzunluğundaki mezkur güzergahın köprü üzerindeki taşıt yolu her iki istikamette iki şeritli olmak üzere banket ve acil park şeritleri ile birlikte $(1,00 + 2 \times 3,75 + 0,0) = 9,00$ mt. genişliğinde oluşturulacaktır. Bu suretle Haliç'i kateden gerek transit ve gerekse yöresel trafik hacimlerinde beher trafik şeridi seviyesinde %40'a varan bir rahatlama temin edilmiş olacaktır.

Ana yol güzergahına ilaveten mevcut Savaklar Caddesi boyunca da yeni bir düzenleme öngörülmüştür. Bu bağlantı mevcut Topkapı-Edirne aksına irtibatlandığı km: 1+406'dan başlayarak köprülülük dönel kavşak haline dönüştürülerek mevcut Edirnekapı kavşağının alt

kotundan geçerek Savaklar Caddesine oturmakta, km: 2+234 ile km: 2+344 arasına inşa edilecek üstgeçit köprüsü ile Savaklardan ayrılarak km: 2+534' de (Anayol km: 9+389) Edirne-İstanbul yönündeki yeni Çelik Köprüye kavuşmaktadır. Yaklaşık 1.5 km. uzunluğundaki bu yeni bağlantının düzenlemesi ile Topkapı-Okmeydanı istikametindeki trafiğin Fatih-Rami yönündeki trafikle kesişmeden devam temin edilecektir. Anılan güzergahların Halıcıoğlu ve Ayvansaray yakalarındaki mevcut yollarla bağlantıları ve yeni duruma uyarlanmaları da aynı proje kapsamı içinde gerçekleştirilecektir.

6.2. Haliç Ortamının Jeolojik Yapısının İncelenmesi

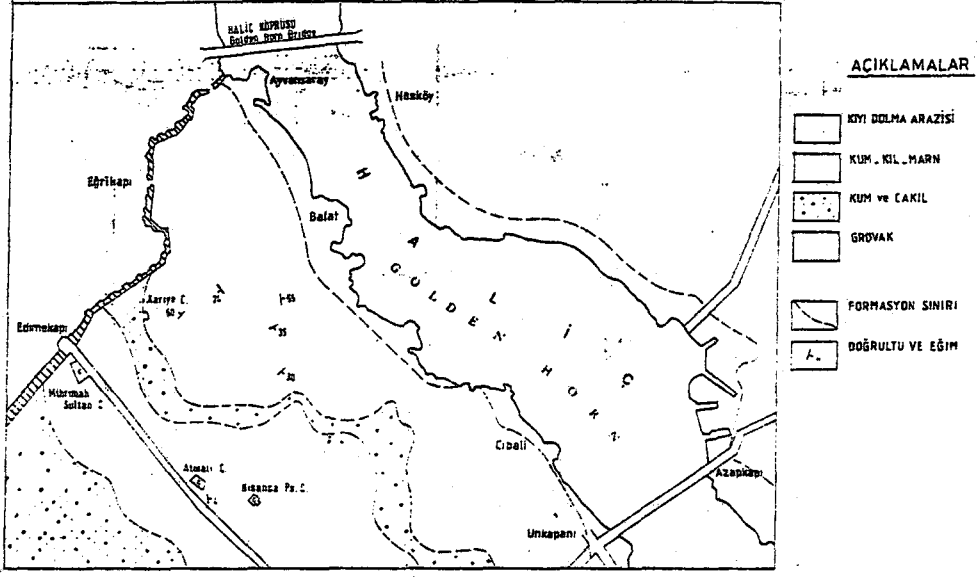
Haliç Köprüsünün ayaklarının inşa edileceği bölgelerle ilgili olarak 35 adeti karada ve 8 adeti denizde olmak üzere toplam 43 adet sondaj yapılmıştır. Arazi çalışmaları sırasında yukarıda belirtilen sondajlara ek olarak 48 adet presyometre deneyi ve çok sayıda standart penetrasyon deneyi yapılmış ve sondajlardan alınan zemin numuneleri üzerinde standart laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

6.2.1. Topoğrafya

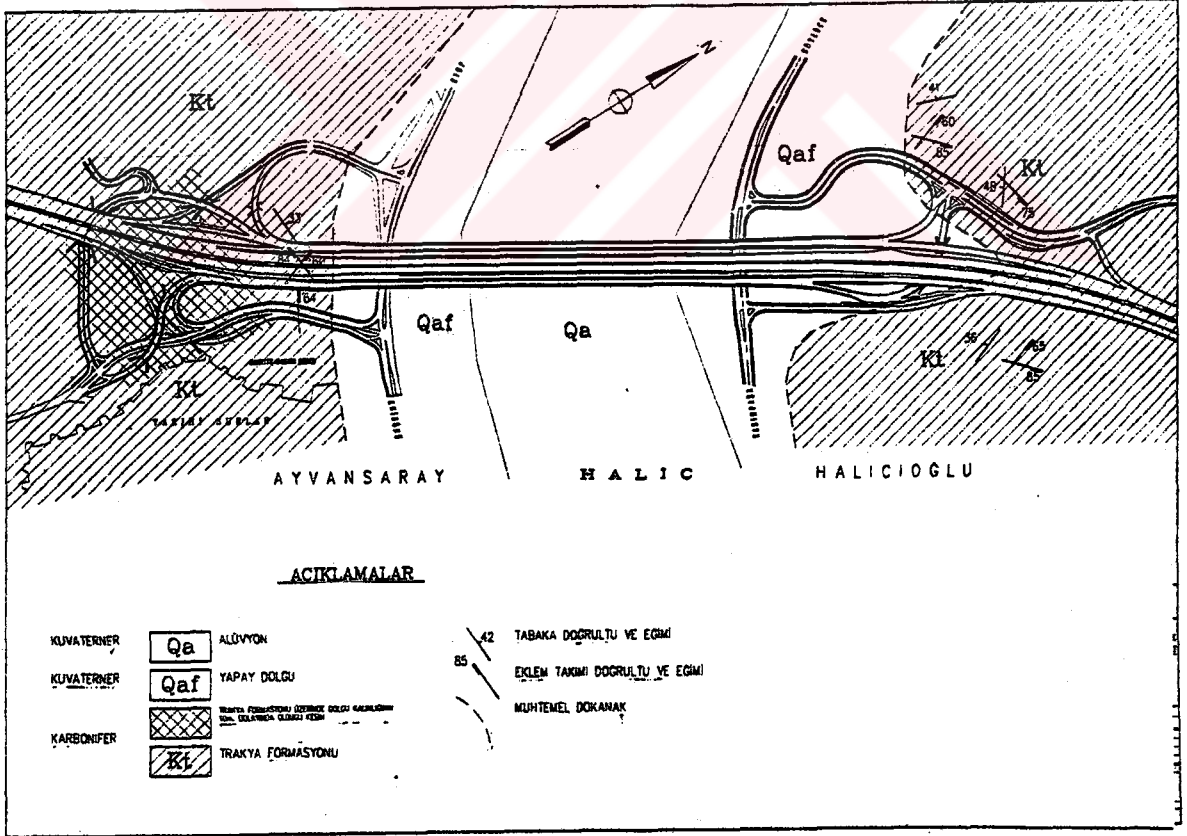
İnceleme alanı, Edirnekapı ile Halıcıoğlu arasında, Haliç'in iki yakasında oldukça eğimli bir bölgede yer almaktadır. Ancak, çalışma alanı mevcut yolların üzerinde olduğundan ve bu yolların yapımı sırasında arazinin doğal eğimi azaltıldığı için güncel yamaç eğimleri, genel topoğrafik eğimden daha yatıktır. Haliç yönünde eğimli olan yamaçlar Haliç düzlüğünde son bulmaktadır. Deniz tabanı gerek Haliç'e boşalan akarsular ve gerekse eski Galata Köprüsünün yeni yerine yerleştirilmesi sırasında yapılan tarama çalışmalarından çıkan malzemenin basılması sonucu dolmuştur. Bu nedenle, yeni köprü aksında su derinliği 0,30 m'ye düşmektedir. Halıcıoğlu tarafında, mevcut doğal kanalda su derinliği 2,0 m dolayındadır.

6.2.2. Jeoloji

İnceleme alanı ve çevresinde yaşları birbirinden çok farklı çökeller yer almaktadır. Bölgesel jeoloji haritası Şekil 6.3'de, Proje alanının jeoloji haritası Şekil 6.4'de verilmiştir(TCK,1994).



Şekil 6.3 Bölgesel jeoloji haritası



Şekil 6.4 Proje alanın jeoloji haritası

Jeolojik istif aşağıdan yukarıya şöyledir.

- Trakya Formasyonu

Trakya Formasyonu yörede ana kayayı temsil etmektedir. Paleozoik (dinansiyen) yaşlı olan bu birim, kumtaşı-kiltaşı-silttaşı birimlerinin karışımından oluşmuştur. Birbiriyle düşey ve yanal geçişli olarak bulunan bu birimler bu görünümüleriyle ve klastik yapıları ile tipik fliş fasiyesindedirler. Tabakalanmaları ince-orta kalınlıktadır ve çok sık ve değişik yönde eklem takımları içermesi sebebiyle çoğunlukla tabaka düzlemlerini belirlemek zordur.

- Süleymaniye Formasyonu

Bu birimlere Edirnekapi kavşağı civarında rastlanmıştır. Kum-kil-marn ardalanmasından oluşmaktadır. Alttaki Paleozoik temel üzerine Sarmasien'e ait kumlar yerleşmiştir. Kumlar homojen bir kalınlık arzmemekte ve bazen kil-marn mercikleri de ihtiva etmektedirler. Kumlar kuvars taneleri ve muskovit pullarından oluşmuş olup demir oksitin tesiri ile sarı renkleriyle kolayca tanınırlar. Kil ve marn tabakaları kumların üzerinde yer alır. Kalınlıkları yer yer 120-150 m. dolayındadır. Silt ve kum yüzdeleri düşük olduğundan genelde yüksek plastisitelidirler.

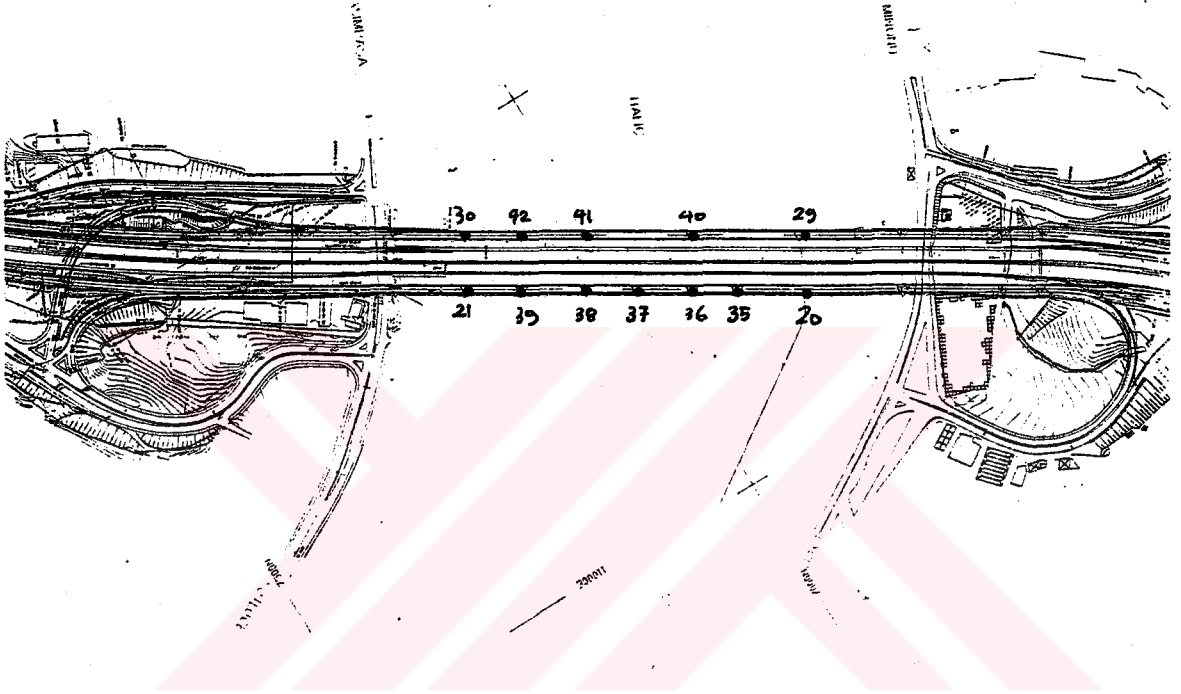
- Tabii ve Suni Dolgular

Tabii dolgular Haliç'in kenarında gözlenmektedir. Bu sedimanlar Alibey ve Kağıthane derelerinin taşıdığı malzemenin durgun haliç denizinde çökmesiyle oluşmuştur. Kalınlıkları yer yer 70-80 m. dolayındadır. Çoğunlukla kavrı ve organik madde ihtiva eden ince kum, silt ve gri renkli kilden oluşmaktadır. Bu sedimanlar çok yeni olduğundan henüz konsolidasyonunu tamamlamamıştır. Sahile yakın kısımlarda genç alüvyonlar üzerine hafriyat malzemesi ve inşaat artıkları dökülmüştür. İnceleme alanında suni dolgular, tüm birimlerin üzerini kaplamış durumdadır. Heterojen bir yapı gösteren suni dolgular genellikle kil boyutundan, blok boyutuna varan malzeme içermektedir. İnceleme alanında suni dolguların kalınlığı yer yer 15 m'ye ulaşmaktadır.

6.2.3. Arazi çalışmaları

6.2.3.1. Sondajlar

Haliç çalışma sahasında yerlerinin bir kısmı Şekil 6.5’de gösterilen, 35 adedi karada, 8 adedi ise denizde olmak üzere toplam 43 adet sondaj yapılmıştır. Bu sondajlardan 35 adedi karada, 8 adedi ise denizde yapılmıştır.



Şekil 6.5 Haliç ortamında yapılan sondaj yerleri

Haliç’in her iki yakasında yapılan kara sondajları rotary yöntem ile yapılmış olup sondajlar ve zemin tanımlamaları BS5930:1981 “Site Investigation” standartına uygun olarak yapılmıştır. Sondajlar sırasında gerekli derinliklere kadar 89 mm ve 114 mm çaplı muhafaza boruları indirilmiştir. Denizde toplam 8 adet sondaj yapılmıştır. Karada ve denizde yapılan sondajların numaraları, derinlikleri, başlangıç kotları ve yeraltısuyu derinlikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Denizde yapılan sondajlar (*) işareti ile belirtilmiştir.

Çizelge 6.1 Sondaj çizelgesi

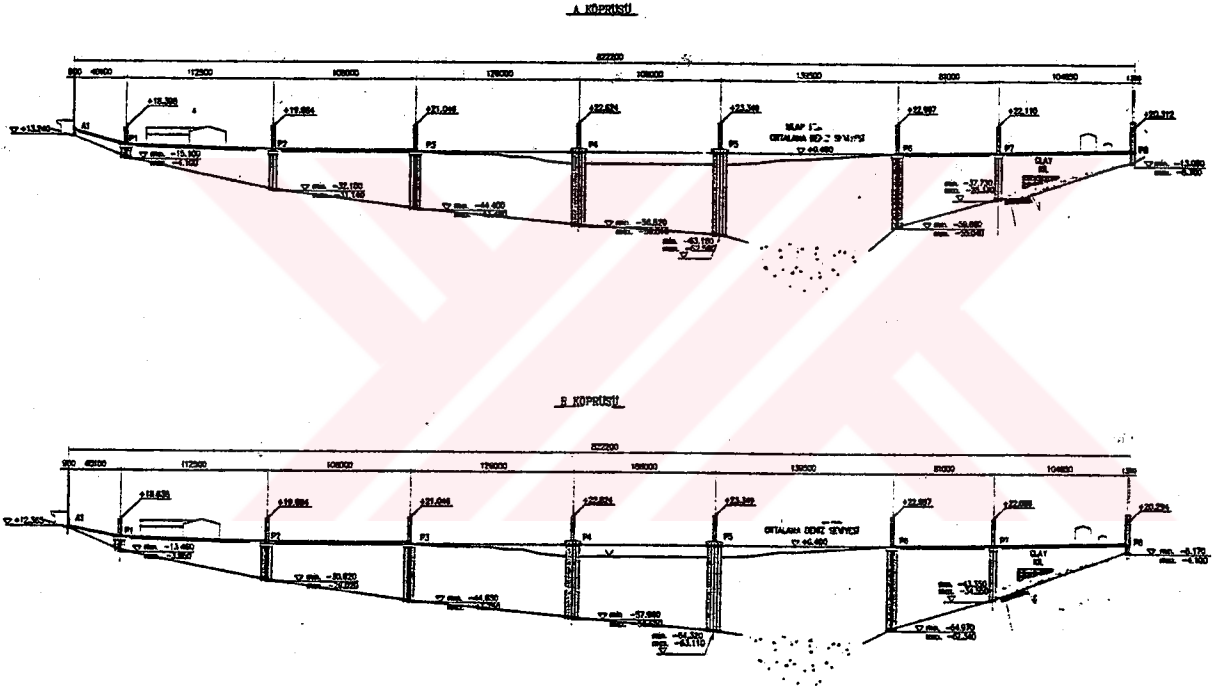
SONDAJ YERİ	SONDAJ DERİNLİĞİ (m)	SONDAJ AĞIZ KOTU (m)	YERALTI SUYU DERİNLİĞİ (m)
S1	13,50	36,59	3,00
S2	30,45	74,82	Yok
S3	29,00	72,42	Yok
S4	25,45	75,15	Yok
S5	20,00	71,25	11,00
S6	8,00	26,00	2,00
S7	17,50	23,22	Yok
S8	16,80	22,88	11,00
S9	17,00	22,00	21,00
S10	7,70	26,51	2,30
S11	17,70	36,68	0,70
S12	18,00	21,98	Yok
S13	21,80	21,44	11,10
S14	15,00	9,14	2,90
S15	15,00	20,61	Yok
S16	18,00	50,20	4,30
S17	10,00	20,86	6,00
S18	15,00	5,64	Yok
S19	38,50	2,01	2,27
S20	53,00	0,85	0,53
S21	66,00	0,86	0,60
S22	43,00	2,00	1,35
S23	12,00	20,04	1,57
S24	15,00	7,50	5,65
S25	17,00	22,18	Yok
S26	10,25	15,60	Yok
S27	14,00	5,53	4,10
S28	33,15	2,19	2,40
S29	50,20	1,39	1,30
S30	69,00	0,67	0,35
S31	48,40	1,40	0,57
S32	15,00	6,24	4,85
S33	11,50	10,60	Yok
S34	11,00	15,71	2,30
S35 (*)	54,30	0,00	Deniz
S36 (*)	64,15	0,00	Deniz
S37(*)	68,10	0,00	Deniz
S38 (*)	69,60	0,00	Deniz
S39 (*)	83,60	0,00	Deniz
S40 (*)	65,85	0,00	Deniz
S41 (*)	75,90	0,00	Deniz
S42 (*)	74,25	0,00	Deniz
S43	19,80	52,31	Yok

6.2.4. Yeraltı suyu gözlemleri

Sondajların yapılması sırasında ve sondajları takiben sondaj delikleri içerisinde yeraltı uyu gözlemleri yapılmıştır. Belirlenen yeraltı suyu seviyeleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

6.2.5. Laboratuvar deneyleri

Sondajlardan alınan zemin ve kaya numuneleri üzerinde KGM 17. Bölge Müdürlüğü, APK ve STFA Kalite Kontrol laboratuvarlarında çok sayıda zemin mekaniği ve kaya mekaniği deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden çıkan sonuçlara göre (A) ve (B) köprülerinin inşa edileceği alanda kazık uzunluklarının max ve min uzunlukları belirlenmiş ve bunlar Şekil 6.6’da gösterilmektedir.

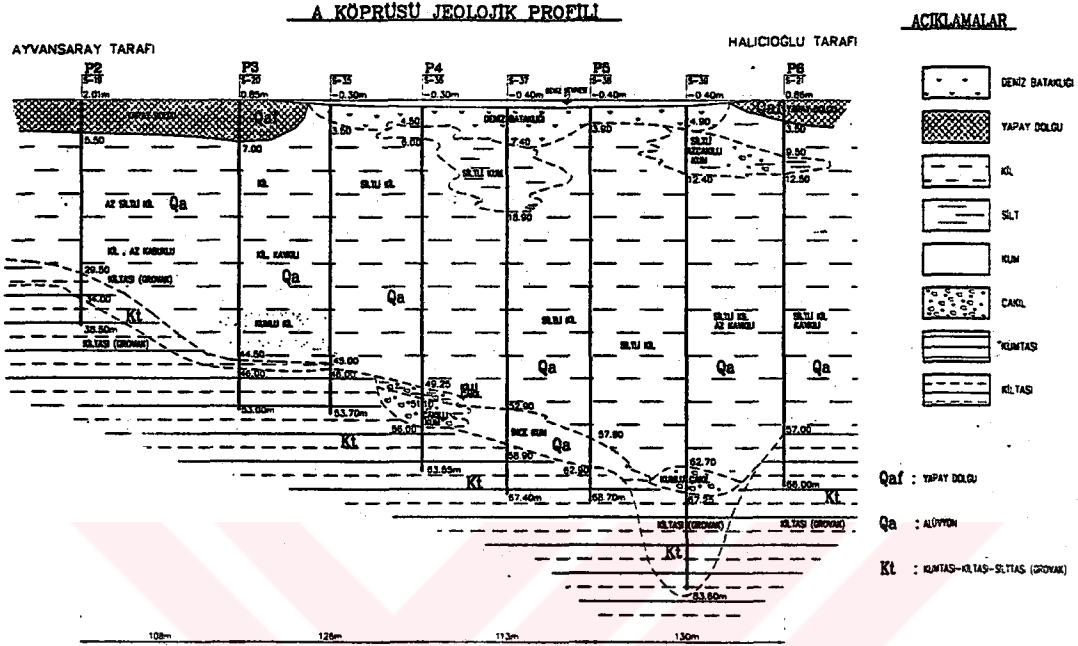


Şekil 6.6 Sondaj sonuçlarına göre max ve min kazık uzunlukları

6.2.6. Zemin profili

Yeni Haliç Köprüleri, (A) ve (B) köprüleri olarak isimlendirilmektedir. Bu köprüler boyunca zemin profillerini belirlemek amacıyla söz konusu köprülerin eksenleri üzerinde, yeni ayak lokasyonlarına rastlayacak şekilde sondajlar yapılmıştır. (Şekil 6.5) (A) ve (B) köprüleri üzerinde yapılan sondajların numaraları, rastladıkları yeni köprü ayaklarının numaraları, sondaj ağız kotları ve taşıyıcı özelliği yüksek olan birime giriş kotları

Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’de verilmiştir.(A) köprüsü ayak lokasyonlarında yapılan sondajların korelasyonu ile çizilen zemin profili Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Bu profilden görülebileceği gibi, (A) köprüsü P2 kenar ayak lokasyonunda S19 nolu sondaj yapılmıştır. S19 sondajında, zemin yüzeyinden itibaren birimine girilmiştir.

Çizelge 6.2 A Köprüsü Sondajları

Sondaj No	Ayak Lokasyonu	Ağız Kotu (m)	Taşıyıcı Birim Kotu (m)
S17	A1	20,86	17,66
S18	P1	5,64	-0,16
S19	P2	2,01	-27,49
S20	P3	0,85	-43,65
S35	P3-4	0	-45,60
S36	P4	0	-56,60
S37	P4-5	0	-59,60
S38	P5	0	-63,60
S39	P5-6	0	-67,95
S21	P6	0,86	-56,14
S22	P7	2,00	-34,50
S24	P10	7,50	-1,45

Çizelge 6.3 (B) Köprüsü Sondajları

Sondaj No	Ayak Lokasyonu	Ağız Kotu (m)	Taşıyıcı Birim Kotu (m)
S26	A1	15,60	11,10
S27	P1	5,53	-3,57
S28	P2	2,19	-26,90
S29	P3	1,39	-43,61
S40	P3-4	0	-54,00
S41	P5	0	-66,60
S42	P5-6	0	-64,60
S30	P6	0,67	-59,50
S31	P7	1,40	-30,10
S32	P8	6,24	-4,26
S33	P10	10,60	7,10
S34	P12	15,70	12,90

(A) köprüsü P2 ayak lokasyonunda S19 sondajı yapılmıştır. Zemin yüzeyinde karşılaşılan 5,50 m kalınlıkdaki heterojen dolguyu takiben Haliç çökellerine girilmiştir. Burada gri renkli, çok yumuşak kıvamdaki az siltli kil içerisinde yapılan penetrasyon deneylerinde 23,0 m derinliğe kadar $N = 0$ penetrasyon sayıları elde edilmiştir. 23,0 m ile 29,50 m derinlikleri arasında orta katı-katı kil tabakası içerisinde ilerlenmiştir. 29,50 m derinlikte (-27,49 m kotu) anakaya kilaşı birimine girilmiş ve 38,50 m derinlikte bu birim içerisinde sondaja son verilmiştir.

(A) köprüsü P3 ayak lokasyonunda S20 sondajı yapılmıştır. Güncel kıyı çizgisinde yapılan S20 sondajında zemin yüzeyi ile 7,0 m derinlik arasında heterojen dolgu tabakası geçilmiştir. 7,0 m - 39,0 m derinlikleri arasında ise gri-siyah renkli, kavkılı ve organik artıklı haliç çökelleri içerisinde ilerlenmiştir. 39,0 m - 44,50 m derinlikleri arasında karşılaşılan yeşil renkli katı kil tabakası haliç çökeli olmayıp tabandaki anakayanın ayrılmış bir ürünüdür. 44,50 m derinlikten itibaren anakaya Trakya formasyonuna girilmiştir.

P 3-4 ayak lokasyonunda yapılan S35 sondajı denizde, 0,35 m su derinliğinde yapılmıştır. Deniz tabanı ile 4,10 m derinlikleri arasında viskoz bir çamur kıvamında bulunan Haliç çökelleri geçilmiştir. Daha sonra girilen gri-siyah renkli, organik artıklı çok yumuşak haliç

çökellelri, anakaya tabakasına girilen 45,60 m derinliğe kadar devam etmektedir. Anakaya Trakya formasyonu çok zayıf kaya özellikleri gösteren kilaşı-kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır.

S36 sondajı, P4 ayak lokasyonunda, denizde yapılmıştır. Su derinliği 0,60 m olarak belirlenmiştir. Haliç tabanı ile 5,10 m derinlik arasında viskoz haliç çamuru içerisinde ilerlenmiştir. Daha sonra girilen gri renkli, kavkılı haliç çökelleri çok yumuşak kıvamda olup 49,85 m derinliğe kadar devam etmektedir. 49,85 m ve 56,60 m derinlikleri arasında sıkı-çok sıkı yerleşmiş kum-çakıl ve blok istifi geçildikten sonra 56,60 m derinlikte çok zayıf kilaşı birimine girilmektedir.

S37 sondajı, P4-5 ayak lokasyonunda yapılmıştır. Bu noktadaki su derinliği 0,30 m. olarak belirlenmiştir. Viskoz Haliç çamuru 8,10 m derinliğe kadar devam etmektedir. 8,10 m ve 19,60 m derinlikleri arasında gevşek siltli kum istifi içerisinde ilerlenmiştir. 19,60 m ve 53,60 m derinlikleri arasında gri renkli çok yumuşak kıvamda olan siltli kil içerisinde sondaj yapıldıktan sonra 53,60 m -59,60 m derinlikleri arasında yer alan çok sıkı ince kum tabakası geçilmiştir. 59,60 m derinlikte anakaya kilaşı birimine girilmiştir.

P5 ayak lokasyonunda S38 sondajı yapılmıştır. Bu noktadaki su derinliği 0,70 m, viskoz Haliç çamuru derinliği ise 4,60 m.dir. Haliç tabanı ile 58,60 m derinlikleri arasında çok yumuşak kil istifi içerisinde ilerlendikten sonra bu derinlikte sıkı-çok sıkı siltli kum tabakasına girilmiştir. 5,0 m kalınlıkdaki bu granüler tabakayı takiben 63,60 m derinlikte anakaya kilaşı birimine girilmiştir.

S39 sondajı P5-6 ayak lokasyonunda yapılmıştır. Su derinliği 0,70 m, viskoz Haliç çamuru derinliği ise 5,60 m'dir. 5,60 m ile 13,10 m derinlikleri arasında yer alan çok gevşek siltli kum istifini takiben 63,10 m derinliğe kadar çok yumuşak-yumuşak siltli kil birimi içerisinde sondaj yapılmıştır. 63,10 m - 67,95 m derinlikleri arasında kumlu çakıla rastlanmıştır. 67,95 m derinlikten itibaren anakaya kilaşı birimine girilmiştir.

S21 sondajı P6 ayak lokasyonunda yapılmıştır. Zemin yüzeyi ile 3,50 m derinlik arasında heterojen dolgu tabakası geçilmiştir. Daha altda çok yumuşak haliç çökellerine içerisinde

ilerlenmiştir. 39,0 m - 57,0 m derinlikleri arasında gri renkli orta katı siltli kil geçildikten sonra 57,0 m ile sonda sonu olan 66,0 m derinlikler arasında anakaya kilaşı içerisinde sondaj yapılmıştır. B köprüsünde yapılan sondajlar A köprüsü sondajları ile benzerlik gösterdiğinden burada detaylı olarak tekrar bahsedilmeyecektir. Zemin profili ile ilgili olarak yukarıda verilen detaylı bilgiler değerlendirilerek, A ve B köprüleri boyunca zemin profilleri aşağıdaki gibi idealize edilebilecektir.

- Batı ve doğu yamaçlar

Batı ve doğu yamaçların üst seviyelerinde, zemin yüzeyinde yer alan sıg dolgu tabakalarını takiben doğrudan Trakya formasyonuna ait kum taşı ve kil taşı bilimleri ile karşılaşmaktadır. Batı yamaçta kum taşları, Doğu yamaçta ise kil taşları egemendir.

- Haliç kıyısındaki düzlükler

Haliç kıyısındaki düz alanlar Haliç'in dolmasıyla bugünkü morfolojisini kazanmıştır. Düz alanlarda zemin profili kalın bir heterojen dolgu tabakası ile başlamaktadır. Batı tarafta dolgu kalınlığı 5,0 m-6,00 m dolayında iken Doğu tarafta 2,50 m – 15,50 m arasında değişmektedir. Dolgu tabakalarının altında Haliç çökelleri yer almaktadır. Genele gri-siyah renkli, bol organik artık içerin siltli kil istifi yüzeye yakın seviyelerde “çok yumuşak”, artan derinliklerde ise “yumuşak” yer yer “orta katı” kıvama sahiptir. Yumuşak kil tabakasını takiben batı tarafta genelde doğrudan anakaya Trakya formasyonu ile karşılaşırken, doğu tarafta yumuşak kil ile anakaya arasında kalınlığı 3,0-5,0 m dolayında olan sıkı kum-çakıl-blok tabakası yer almaktadır.

- Haliç çukuru

Yeni inşa edilecek köprülerin eksenleri boyunca yapılan sondajlarda belirlenen su derinlikleri genelde 0,60-0,70 m dolayındadır. Haliç tabanında önce 4,0 m – 8,0 m kalınlıkta viskoz kıvamda bir çamur tabakası ile karşılaşmaktadır. Bu tabakayı takiben çok yumuşak-yumuşak veya çok gevşek Haliç çökelleri bulunmaktadır. S35 sondajı hariç olmak üzere diğer bütün sondajlarda yumuşak kil tabakası ile anakaya kilaşı arasında yer alan ve kalınlığı 3,50 m- 8,00 m arasında değişen çok sıkı kum-çakıl-blok istifi ile karşılaşmıştır. Haliç'in topografyasına bağlı olarak deniz içerisinde yapılan sondajlarda çeşitli derinliklerde anakaya kilaşı birimine girilmiştir. Çizelge 6.2'den

görülebileceği gibi S39 sondajında anakaya kotu -67,95 m, S41 sondajında ise -66,60 m olarak belirlenmiştir.

6.2.7. Geoteknik değerlendirme

- P3 orta ayak temeli

Her iki ayakta, betonarme kazıkların anakaya içerisine yaklaşık -46,50 m kotuna kadar indirilmesi gerekmektedir.

- P6 orta ayak temeli

S30 sondajında, anakaya üzerinde 4,50 m kalınlıkta blok-çakıl tabakası yer almaktadır. Kazık yapımında bu tabaka geçilerek kazık uçları anakaya içerisine yeterince sokulmalıdır. (A) köprüsünde kazıkların uçları -59,0 m, (B) köprüsünde ise -66,50 m kotuna indirilmelidir.

6.2.8. Çelik boru çakma kazıklı temeller

İnşa edilecek (A) ve (B) köprülerinde, P4 ve P5 temellerinin her biri 14 adet $D = 1000$ mm çapında, $\delta = 12$ mm et kalınlığında olup ucu açık çakılacak çelik boru kazıklara taşıtılacaktır. Çelik sınıfı SKK 400 (Japon Standardı) olarak seçilmiştir. Hesaplarda et kalınlığı $\delta = 10$ mm olarak dikkate alınmış ve 2 mm'lik korozyon payı bırakılmıştır. Kazıklarda $\delta = 10$ mm için çelik kesit alanı $A = 309,8 \text{ cm}^2$, atalet momenti $I = 376 \times 10^3 \text{ cm}^4$ hesap edilmiştir. Çelik boru kazıkların üstten 20,0 m'lik bölümleri betonlanacaktır. P4 ve P5 ayaklarında çakılan çelik boru kazıkların aşağıda verilen kazık boylarında refü almaları beklenmelidir.

Çizelge 6.4 Çelik kazıkların refü boyları

Ayak No	(A) L (m)	(B) L(m)	(A) Refü Kotu	(B) Refü Kotu
P4	57,00	57,00	-57,00	-57,00
P5	64,00	67,00	-64,00	-67,00

6.3. Haliç Ortamının Koroziyon ile İlgili Ölçme ve Deneyler

Şekil 6.6'daki ve Şekil 6.7'deki jeolojik profillerden ve katodik koruma uygulanacak P3, P4, P5, P6 köprü taşıyıcı çelik kazıkların konumlarından da görüldüğü üzere Haliç

ortamında çelik kazıkların çakıldığı bölgelerin zemini itibariyle iki ayrı yapıdan oluşmaktadır.

1.Deniz kıyısında zeminindeki çelik kazıklar (P3 ve P6)

2.Deniz içerisindeki çelik kazıklar (P4 ve P5)

Bu sebeple Haliç çalışma sahasında jeolojik araştırmalarda olduğu gibi (Bölüm 6.2) hem zeminde, hem de deniz suyu içerisinde olmak üzere farklı ortamlarda ölçme ve deneyler yapılmıştır. Korozyon ile ilgili ölçme ve deneyler değişik zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Bunlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. 1972 yılında (Eski köprünün inşası esnasında)
2. 1995 yılında (Yeni köprülerin inşasına başlarken)
3. 1997 yılında (Kazıkların katodik koruma projelerine başlarken)
4. 1998 yılında (Zemin ölçmelerini tekrarlamak amacıyla)

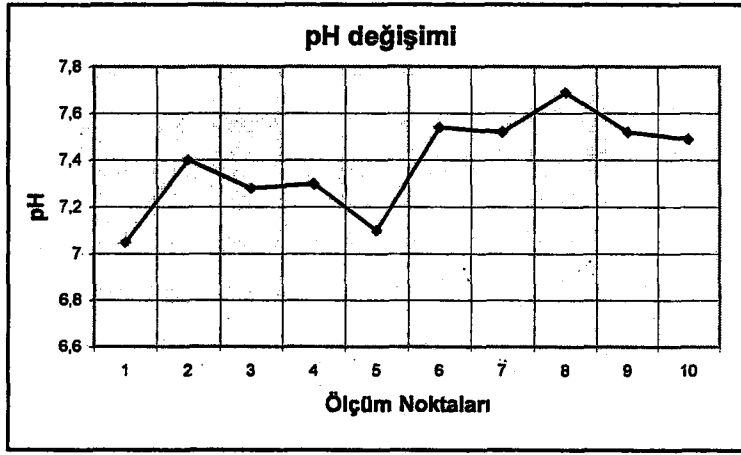
Yapılan ölçme ve deneylere ait yöntemler ve sonuçlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmış olup sonuçlar Çizelge ve grafikler halinde desteklenmektedir.

6.3.1. 1972 yılındaki ölçmeler

Zeminde yapılan pH ölçmeleri Çizelge 6.5 gösterilmektedir. Buna göre Haliç ortamında 1972 yılında yapılan ölçmeler esnasında pH 7,05 ile 7,54 arasında değiştiği görülmektedir(TCK,1972).

Çizelge 6.5 Zeminin farklı bölgelerinde pH değerleri.

Ölçüm No	pH değeri
1	7,05
2	7,40
3	7,28
4	7,30
5	7,10
6	7,54
7	7,52
8	7,69
9	7,52
10	7,49



Şekil 6.8 1972'deki pH sonuçları

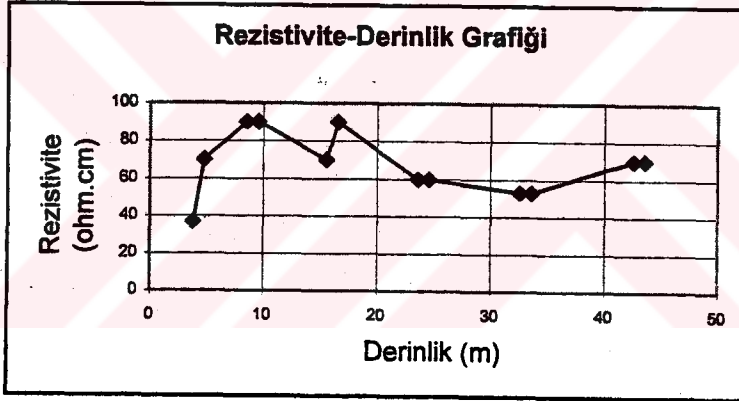
Daha sonra zemin rezistivitesini belirleyebilmek amacıyla ölçmeler gerçekleştirilmiştir. Buna göre 1972 yılında, inşa edilmesi düşünülen eski Haliç Köprüsü zemininin rezistivitesini belirlemek amacıyla Rosengvist teorisi kullanılarak ölçmeler ve deneyler yapılmıştır(TCK,1972). Rosengvist(1961) teorisine göre zemin içerisinde korozyon probu kullanılmak suretiyle elde edilen bilgilerden ortalama korozyon hızı hesaplanabilmektedir. Korozyon probu ucunda magnezyum elektrodu bulunan bir borudan ibarettir. Magnezyum elektrodu borudan elektriksel olarak yalıtılmıştır. Korozyon probu yeraltına yerleştirilir ve iki metalin uçları elektriksel olarak birbirine bağlanırsa bir korozyon hücresi oluşturulur. İki metal arasında akım ve kutuplar arasındaki direnç ölçülür, elektrik direncinin ölçülen değeri kullanılarak zemin rezistivitesi hesaplanır. Devreden akım geçerken ölçülen akım (I) ile direnç (R) çarpılarak potansiyel elde edilir. Buna göre:

$$N = \frac{E}{-E_0} \quad (6.1)$$

eşitliği kullanılarak depolarizasyon değeri bulunur. Burada E_0 referans ortamın potansiyelidir. Deney sonuçları, elde edilen depolarizasyon değeri ve hesaplanan değerler Çizelge 6.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6 1972'deki zemin rezistivite deneyi sonuçları

Derinlik (m)	Zemin Cinsi	I (mA)	R (ohm)	ρ (ohm.cm)	E (mV)	N (%)
3,85	Çamur	102	5	37	510	41
4,85	Çamur	110	7	70	770	62
8,6	Çamur	110-118	8	90	880-940	71-76
9,6	Kil	104-110	8	90	832-880	67-71
15,6	Kil	115-117	7	70	805-820	65-66
16,6	Kil	110-115	8	90	880-920	71-74
23,6	Kil	130	6,5	60	840	68
24,6	Kil	132	6,5	60	860	69
32,6	Kil	135-136	6	53	810-816	65-66
33,6	Kil	141-143	6	53	845-860	68-69
42,6	Kil	114-120	7	70	800-840	65-68
43,6	Kil	120	7	70	840	68



Şekil 6.9 1972'deki sonuçlara göre rezistivite-derinlik grafiği

Rosengvist'e göre elde edilen rezistivite ve depolarizasyon değerleri kullanılarak zemin çeşitli korozyonluk gruplarına ayrılabilir. Literatür bilgilerinden yararlanarak korozyonluk sınıflaması şöyle yapılır.

Çizelge 6.7 Zeminin korozyonluk gruplaması

KOROZYONLUK DERECESİ	
Grup 1	Ölçülemeyen korozyonluk
Grup 2	Zararsız korozyonluk
Grup 3	Bazı koşullarda korozyonluk kazıklara zararlı olabilir
Grup 4	Normal ölçülerdeki korozyonluk (kazıklara zararlı)
Grup 5	Çok yüksek korozyonluk

Koroziflik grupları ile elektriksel bilgiler arasındaki irtibat Çizelge 6.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.8 Rezistivite-koroziflik arasındaki irtibat

Rezistivite (ohm.cm)	Depolarizasyon miktarı			
	40%	40-60%	60-80%	80-100%
100	2	3	4	5
100-500	2	3	3-4	4-5
500-2500	2	2	3	4
2500-12500	1	2	2-3	3-4
12500	1	1	1-2	2-3

SONUÇ: 1972’deki projelendirmeyi gerçekleştirmek amacıyla yapılan deney sonuçlarından elde edilen Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8’deki değerler kullanılarak Haliç çalışma sahasının koroziflik derecesinin 4.gurup olduğu sonucuna varılabilir.

6.3.2. 1996 yılında yapılan ölçmeler

Haliç çamurunu ve zeminini hafriyat çalışmalarından dolayı yer değiştirmeden önce Yeni Haliç Köprülerinin inşasına başlarken zemin ve suyun koroziflik araştırması incelenmiş ve bu amaçla 18 Ocak 1996 tarihinde ölçme ve deneyler gerçekleştirilmiştir (TCK, 1996; BAC,1996). İlk olarak şantiye sahasının zemininde ve deniz suyunda ölçmeler gerçekleştirilmiş daha sonra aynı yerlerden alınan numuneler 25.01.1996 tarihinde laboratuvar ortamında tekrar incelemeye tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 6.9 Şantiyedeki etüt sonuçları (18.01.1996)

	P3		P4 ve P5		P6
	Yüzeyde	2 m. Aşağıda	Yüzeyde	2 m. aşağıda	Yüzeyde
pH	7,8		7,8		7,7
İletkenlik (mS/cm)	2,4	18,8	2,4	19,1	2,4
Rezistivite (ohm.cm)	416	53,2	416	53	416
Oksijen Yoğunluğu (mg/litre)	6,6	0,5	6,9	0,7	5,7
Sıcaklık(°C)	4,4	5,5	4	5,5	5,4

Çizelge 6.10 Şantiyeden alınan örneklerin laboratuardaki sonuçları(25.01.1996)

	P3	P4 ve P5	P6	Çamurda
	Yüzeyde	Yüzeyde	Yüzeyde	
PH	6,97	6,85	6,95	7,08
İletkenlik(mS/cm)	2,6	2,7	1,9	16,8
Rezistivite (ohm.cm)	385	370	526	59,5
Oksijen Yoğunluğu (mg/litre)				0,2
Sıcaklık ($^{\circ}$ C)	21	21	21	21

Genel görüş olarak çamur tabakasının altında oksijen yoğunluğu çok düşükse galvanik korozyon meydana gelmeyecektir. Sudaki örnekler göstermektedir ki yüzeyde oksijen yoğunluğu 6,75 mg/lt, yüzeyin 2 m altında 0,6 mg/lt, civarındadır. Çamur tabasındaki oksijen yoğunluğu sadece 0,2 mg/lt'dir. Daha aşağılardaki kil tabakasında hiç oksijen olmayacağı muhtemeldir. Oksijen olmadığı için kil tabakasında korozyonda oluşmayacaktır. Bu bilgilerin ışığında çelik kazıkların ilk 8 m'lik kısmı için (deniz yüzeyi ile kil başlangıcı arası) katodik koruma uygulanması gereklidir (TCK,1996 ; BAC ,1996).

6.3.3. 1997 yılındaki ölçme ve deneyler

Eski ve yeni Haliç Köprüsünün çelik taşıyıcı kazıklarının katodik korumasının yapılması projesi çerçevesinde zeminde ilgili etütler tekrar gerçekleştirilmiştir (Broomfield, 1992). Etüt yöntemleri ve etütte kullanılan cihazlar şöyledir.

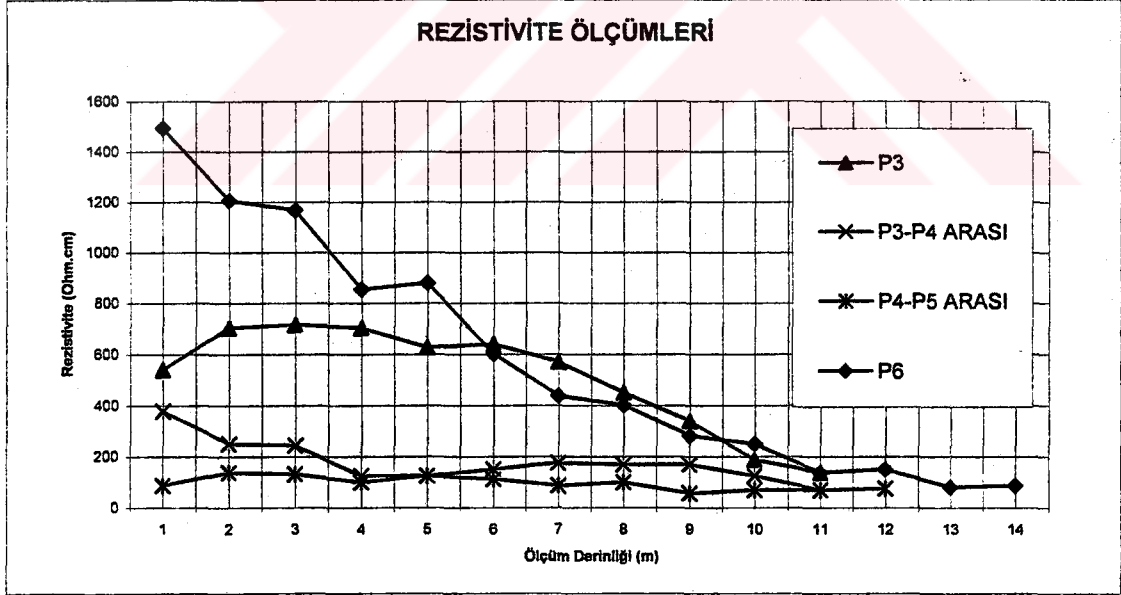
- Rezistivite : Wenner 4 nokta yöntemi ile
- İletkenlik : Hücre sabiti 1 cm-1 olan kontaktimetre ile
- pH : pH metre ile
- TDS (Total Dissolved Solid) : Özel elektrodlu TDS ölçüm cihazı ile

Daha öncede bahsedildiği gibi etütler iki temel farklı yapı olan deniz kıyısında (zeminde) ve deniz içerisinde farklı yorumlarda gerçekleştirilmiştir. Bu etüt sonuçlarının tümü Çizelge ve grafikler halinde aşağıdadır (TCK,1996).

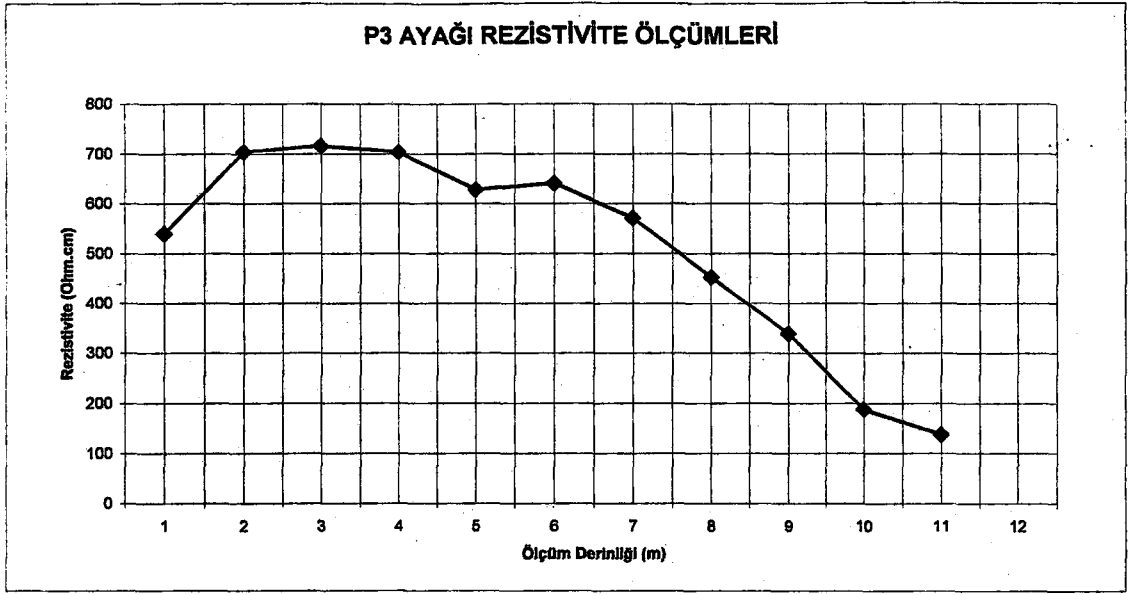
-Rezistivite etütleri

Çizelge 6.11 Rezistivite ölçümleri

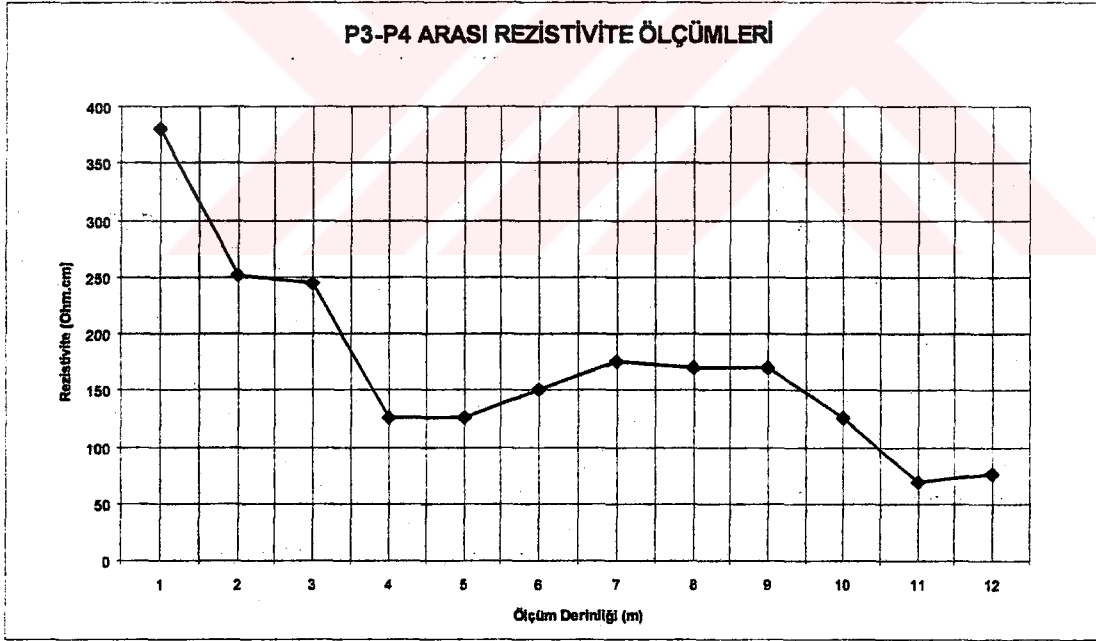
Ölçüm Derinliği (m)	REZİSTİVİTE (ohm.cm)						
	P3	P3-P4 Arasında	P4-P5 Arasında	P6	Ölçüm Aralığı (m)	Ohm (ohm)	Rezistivite (ohm.cm)
1	540.08	379.80	87.92	1494.64	1.00	0.14	87.92
2	703.36	251.20	138.16	1205.76	2.00	0.11	138.16
3	715.92	244.92	131.88	1168.08	3.00	0.07	131.88
4	703.36	125.60	100.48	854.08	4.00	0.04	100.48
5	628.00	125.60	125.60	879.20	5.00	0.04	125.60
6	640.56	150.72	113.04	602.88	6.00	0.03	113.04
7	571.48	175.84	87.92	439.60	7.00	0.02	87.92
8	452.16	170.00	100.48	401.92	8.00	0.02	100.48
9	339.12	169.56	56.52	282.60	9.00	0.01	56.52
10	188.40	125.60	69.00	251.20	12.00	0.01	75.36
11	138.16	69.08	69.00	138.16			
12		75.36	75.36	150.72			
13				81.64			
				87.92			



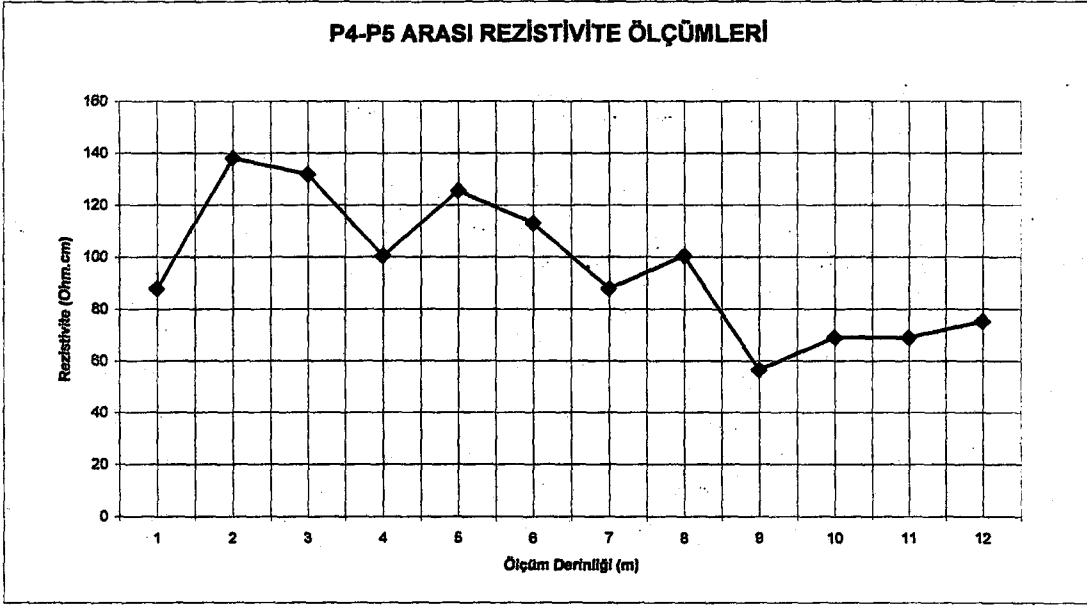
Şekil 6.10 Derinlik-Rezistivite etütlerinin toplu grafiği



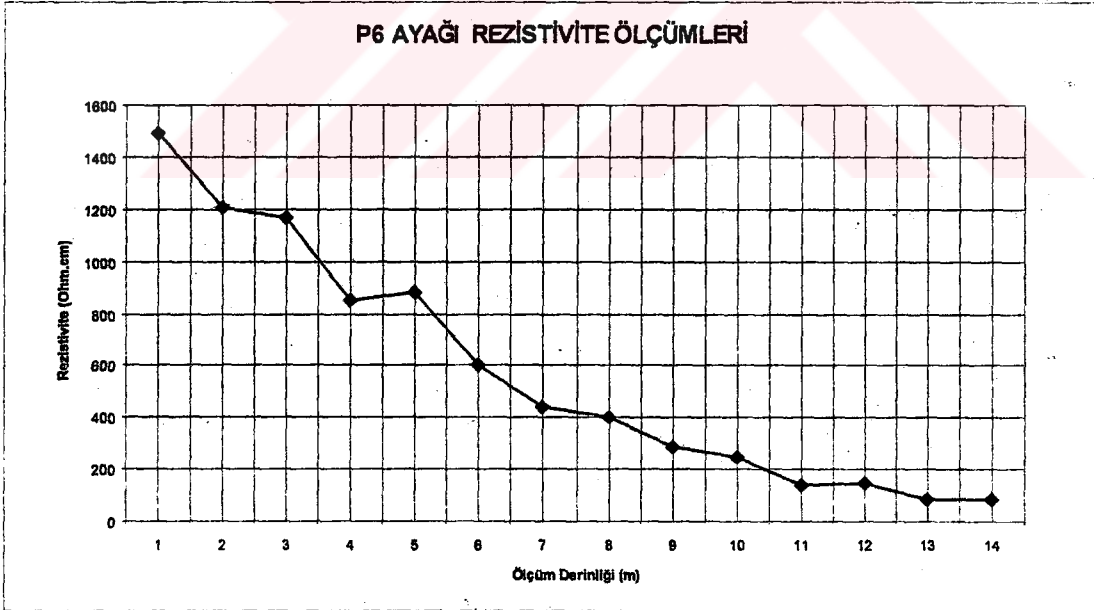
Şekil 6.11 P3 ayağı derinlik-rezistivite grafiği



Şekil 6.12 P3-P4 arası derinlik-rezistivite grafiği



Şekil 6.13 P4-P5 arası derinlik-rezistivite grafiği

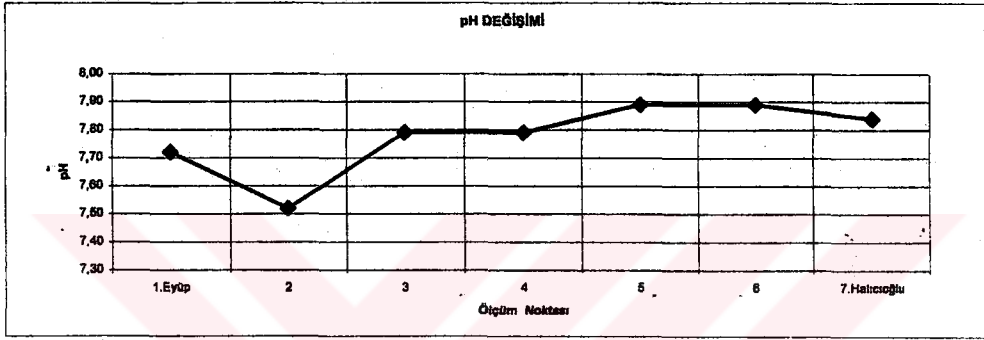


Şekil 6.14 P6 ayağı derinlik-rezistivite grafiği

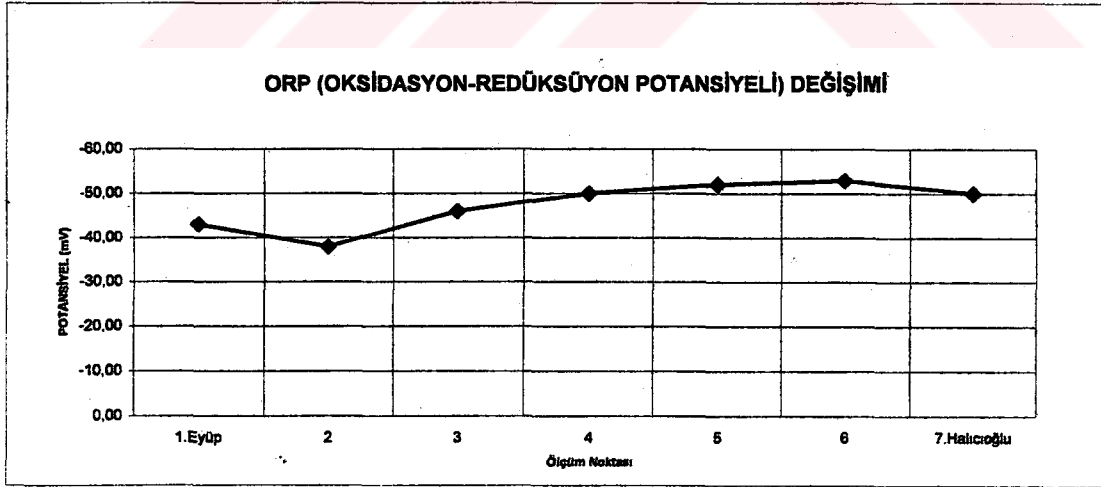
-pH ve ORP (Oksidasyon-Redüksiyon Potansiyeli) etütleri

Çizelge 6. 12 pH ve ORP etütleri

Ölme veri	pH	ORP (mV)
1.Eyüp	7.72	-43
2	7.52	-38
3	7.79	-46
4	7.79	-50
5	7.89	-52
6	7.89	-53
7.Halıcioğlu	7.84	-50



Şekil 6. 15 pH değişim grafiği

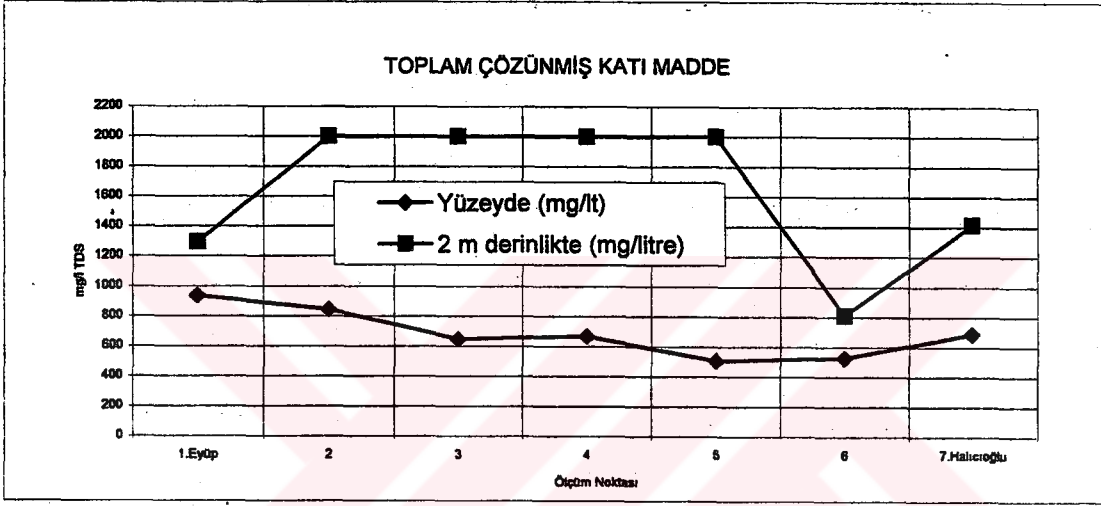


Şekil 6.16 ORP değişim grafiği

-Toplam Çözünmüş Katı Madde

Çizelge 6.13 Toplam çözünmüş katı madde etütleri

Ölçme yeri	Yüzeyde (mg/lit)	2 m derinlikte (mg/lit)
1.Eyüp	937	1296
2	845	2000
3	647	2000
4	670	2000
5	506	2000
6	528	810
7.Halıcioğlu	668	1415

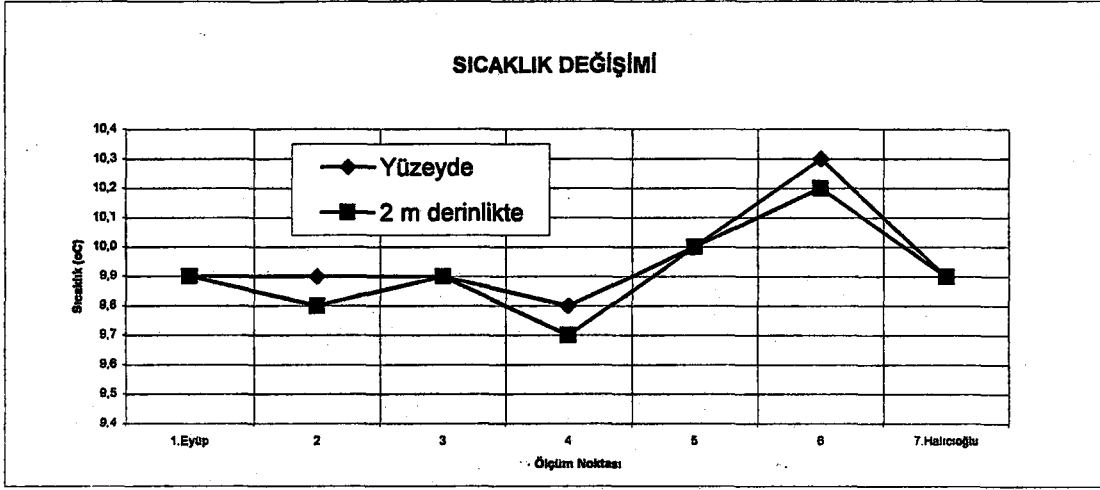


Şekil 6.17 Toplam çözünmüş katı madde grafiği

-Sıcaklık Değişimi

Çizelge 6.14 Sıcaklık değişimi

Ölçüm yeri	Yüzeyde (°C)	2 m derinlikte (°C)
1.Eyüp	9,9	9,9
2	9,9	9,8
3	9,9	9,8
4	9,8	9,7
5	10	10
6	10,3	10,2
7.Halıcioğlu	9,9	9,9

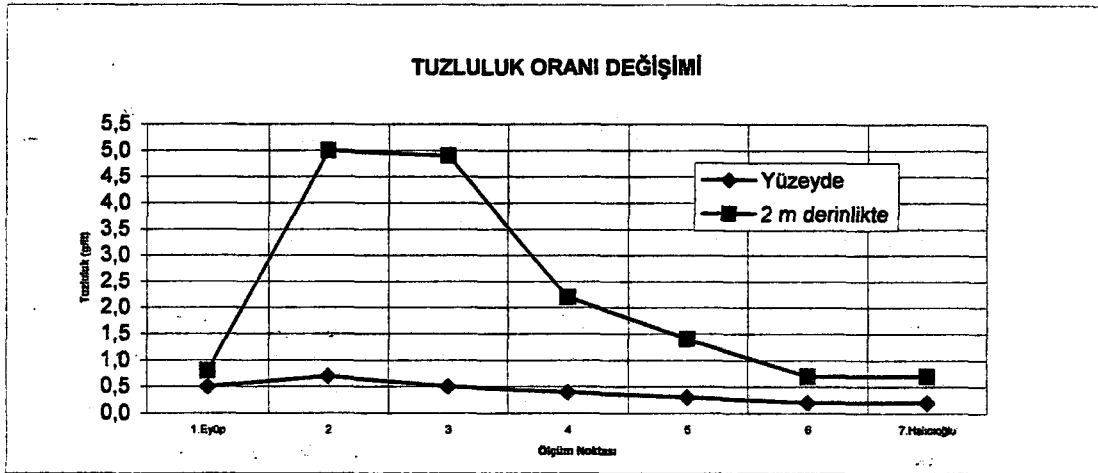


Şekil 6.18 Sıcaklık değişimi grafiği

-Tuzluluk

Çizelge 6.15 Tuzluluk değişimi etütleri

Ölçüm yeri	Yüzeyde, (%)	2 m derinlikte (%)
1.Evüp	0.5	0.8
2	0.7	5.0
3	0.5	4.9
4	0.4	2.2
5	0.3	1.4
6	0.2	0.7
7.Halıcioğlu	0.2	0.7

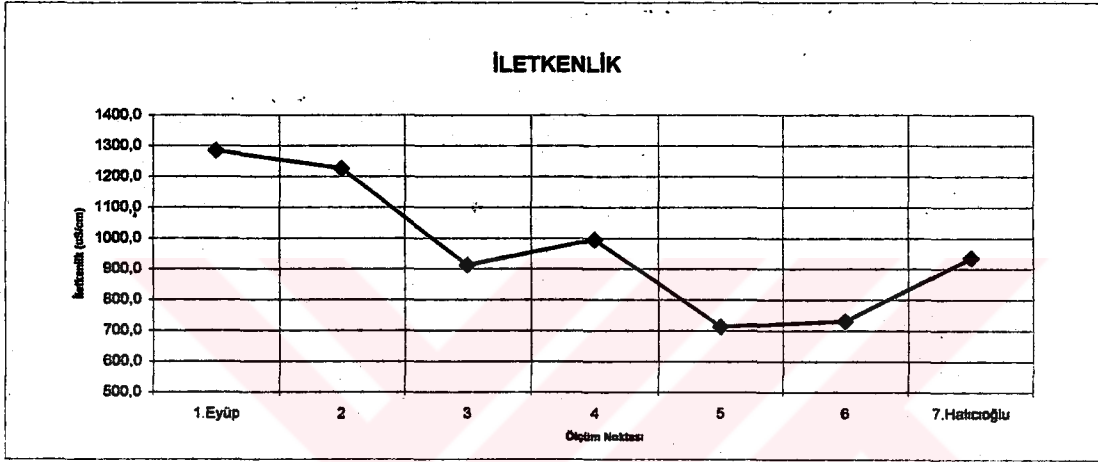


Şekil 6.19 Tuzluluk grafiği

-İletkenlik

Çizelge 6.16 İletkenlik değişimi grafiği

Ölçüm veri	(ms/cm)	Sıcaklık
1.Eyüp	1284.0	9.9
2	1226.0	10.2
3	913.0	10.3
4	995.0	10.1
5	714.0	10.0
6	731.0	10.0
7.Halıcioğlu	936.0	10.3



Şekil 6.20 İletkenlik değişim grafiği

6.4. Ortamın Özgül Direncinin Parametrik Formülasyonu

Katodik koruma yapılacak yerin kara parçası veya su (çamur) olmasına göre özgül direnç değerlerinin değiştiği bilinmektedir. Kara parçası için özgül direnç

$$\rho = \text{fonk.}(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6) \quad (6.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ parametreleri sırasıyla bağıl nemi, sıcaklığı, kimyasal etkileri derinliği, tabaka (katman) sayısına göre üniform/non-üniform toprağı ve toprağın cinsini tanımlamaktadır.

k_1 : Toprağın bağıl nem oranı kuru mevsimlerde %10, yağışlı mevsimlerde ortalama %35 kadardır. Nem oranının düşük olması özgül direncin çok artmasına yol açar.

- k_2 : $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de toprak içindeki su donar ve topraktaki "özdirenç ısı katsayısı" artar; bu katsayı negatif olduğundan ısı düştüğünde özgül direnç artmaktadır.
- k_3 : Zeminin tuzluluğu, asitliği, havalanabilme ve sıkışma özellikleri, yer altı su seviyesi, dönemlik olarak çevreden bırakılan kimyasal atıklar vb. toprağın kimyasal yapısını etkileyerek özgül direnci değiştirebilmektedir.
- k_4 : Yeryüzünden derine indikçe toprağın özgül direnci daha kararlı hal alır. Derin noktalarda, yüksek nem olduğu gibi don etkisi de ortadan kalkar.
- k_5 : Toprağın tek tabakalı (homojen=üniform) yada çok tabakalı (non-üniform) olduğu jeolojik etütler sonucu tayin edilebilir.
- k_6 : Toprağın doğal yapısı ve karakterince ilişkin bir parametredir. ρ sert zeminde büyük değerler alır.

Toprağın non-linear karakteri dolayısıyla, modellemelerde "toplamsallık teoremi" kullanılamaz. Homojen yapı olmadığı zaman, zeminin n adet katmandan oluştuğu düşünülebilir.

Arazide A,B,C,... gibigözlem noktalarında yapılacak jeolojik etütler, ortalama olarak katman sayısı, katmanların niteliği ve katman kalınlıkları hakkında bilgi verebilir. Ancak ikiden fazla katman olması halinde bile ρ 'nun parametrik formülasyonu güçleşmektedir. İki katman halinde ise

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (6.3)$$

Parametresi kullanılabilir. Katmanlar arası mesafe h ise, $h=0$; $K=0$ olması üniform toprağa karşılık düşücektir.

Sulu (çamurlu) zemin için özgül direnç

$$\rho^l = \text{fonk.}(k'_1, k'_2, k'_3, k'_4, k'_5) \quad (6.4)$$

şeklinde yazılabilir. k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 parametreleri sırasıyla akıntı hızını, sıcaklığı, kimyasal etkileri, derinliği, çamur/su katmanlarını tanımlamaktadır.

Özgül direnç zamanla değişiklik gösterdiği için anlık değerler söz konusudur; bu sebeple her t anı için ρ^t ve ρ^{tt} değerleri geçerlidir.

6.5. Haliç Ortamının Korozyon Derecesinin Değerlendirmesi

6.5.1. Deniz suyu ve deniz bataklığı ortamının korozyon değerlendirilmesi

4. Bölümde geniş olarak anlatıldığı üzere deniz içi korozyonunun mevcudiyeti ve gelişimi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar:

- pH'in etkisi
- Çözülmüş tuzların etkisi
- Çözülmüş oksijenin etkisi
- Rezistivitenin etkisi
- Sıcaklığın etkisi
- Fouling etkisi
- Hızın etkisi
- Kirliliğin etkisi

Bu faktörleri ölçme ve deneyler neticesinde elde edilen değerlere göre her faktörün incelemesi ve Haliç'in korozyonluğu aşağıda sırasıyla değerlendirilmiştir.

Deniz suyunun pH derecesi normal koşullarda 8,1 ile 8,3 arasında değişir. Örneğin İstanbul Boğazında pH derecesi 8,1'dir. Yüzeye yakın bölgelerde güneş ışınlarının etkisiyle yürüyen fotosentez olayı yüzeyde karbondioksitin azalmasına pH'ın ise artmasına neden olur. Bu durum çürüten organik maddelerin çıkardığı karbondioksit ve hidrojen sülfür'den ileri gelir. Derinlere doğru inildikçe pH derecesi 7,5'lere düşmektedir. Deniz suyunun pH derecesinin yüksek olması deniz suyu içinde katodik reaksiyonun hidrojen çıkışı ile değil, çözülmüş oksijen redüksiyonu şeklinde yürümesine neden olur. Yani deniz suyunun pH derecesinin korozyon üzerinde doğrudan etkisi görülmez.

Haliç ortamında yapılan etütlerde pH,

1972 yılında : 7,04 ile 7,69 arasında (Arazide)

1996 yılında	: 7,7 ile 7,8 arasında (Arazide)
1996 yılında	: 6,85 ile 6,95 arasında (Laboratuvarı)
1997 yılında	: 7,52 ile 7,84 arasında (Arazide)

bulunmuştur. Bölüm 4.4.1'de de belirtildiği gibi pH'ın 9'dan düşük değerlerinde çelik yüzeyinde her ne sebeple olursa olsun doğrudan ve dolaylı olarak korozyon olayı meydana gelmektedir.

Çözünmüş tuzlar korozyon üzerinde iki şekilde etki yapar. Birincisi çözünmüş tuz konsantrasyonu arttıkça elektriksel iletkenlikte artış olur. İkincisi deniz suyu içinde klorür konsantrasyonun yüksek oluşu bu iyonun metal yüzeyinde oluşan pasif tabakayı kolayca bozmasına neden olur. Tuzluluk derinlere inildikçe artar. Haliç ortamındaki etütlerde yüzeyde tuzluluk %0,2 ile %0,7 arasında bulunmuştur. Bu miktar, sonraki paragraftan da anlaşılacağı üzere iletkenliğin ve dolayısıyla korozyonun yüksek olmasına sebeptir.

Deniz suyu içerisinde çeliğin korozyon hızı doğrudan çözünmüş oksijen konsantrasyonuna bağlıdır. Deniz suyu içerisinde yürüten korozyon olayında katot reaksiyonu yalnızca çözünmüş oksijen redüksiyonu ile yürür. Oksijenin kaynağı atmosferdir. Bu nedenle yüzeyde maksimum olan oksijen derinlerde azalır. Oksijen konsantrasyonu tuzluluğun artışı ile azalmaktadır. Bu sebeple deniz dibindeki korozyon hızı son derece düşüktür. Haliç ortamında yapılan etütlerde oksijen yoğunluğu,

Yüzeyde	: 6,75 mg/lt
2 m. derinde	: 0,6 mg/lt
Çamurda	: 0,2 mg/lt

bulunmuştur. Buradan görüldüğü üzere aşağılara inildikçe oksijen aniden azalmakta olup daha da aşağılarda (kil ve grovak zeminde) oksijen yoğunluğunun sıfır olacağı muhtemeldir. Yüzeyin hemen aşağısında oksijen yoğunluğunun azalmasının sebebi Haliç dibinin tamamen çamurla kaplı olmasıdır. Ancak 1997 yılı içerisinde Haliç çamurunun taranmasından sonra su derinliği arttığından oksijen yoğunluğunun da buna paralel olarak artmış olması muhtemeldir. Tüm bu bilgiler ışığında derin kısımlarda oksijen yoğunluğunun doğrudan sebep olduğu korozyona rastlanmayacaktır veya çok düşük olacaktır denilebilir. Derinlerde ve çamur içerisinde anaerobik ortam söz konusu ise korozyon hızı beklenenden daha yüksektir. Haliç ortamı anaerobik ortam bakımından son

derece zengin olduğundan derinlerde korozyon hızını beklenenden daha yüksek düşünebiliriz.

Deniz suyunun korozyon açısından en dezavantajlı durumu rezistivitenin çok düşük olmasıdır. Rezistivitenin tersi olan iletkenlik su içinde çözülmüş olan tuzların cinsine ve miktarına bağlıdır. Tuz konsantrasyonu arttıkça iletkenlik de artar. Haliç deniz suyunun ve deniz bataklığının derinliğe bağlı olarak rezistivitesi 56,52 ohm.cm ile 138,16 ohm.cm arasında değişmektedir (Çizelge 6.10). Doğal olarak korozyon bu rezistivite aralığında yüksek olacaktır.

Deniz suyu içinde çok sayıda hayvan ve bitkinin yaşadığı bilinmesine rağmen Haliç çok kirli bir ortam olduğundan organizmaların yaşaması mümkün değildir. Aynı zamanda denizde ve deniz bataklığı içerisinde her an için asidik ortam söz konusudur ve bu durum korozyonun artmasına neden olur.

Suyun veya yapının hareketli olması korozyon hızının artmasına neden olur. Ancak Haliç ortamında çelik kazıklar sabit olup suyun akıntısı da minimum düzeydedir. Deniz suyunun kirlenmesi sonucu tuzluluk derecesinde önemli bir artış görülmez. Diğer taraftan deniz suyu içinde organik madde miktarında artış meydana gelir ve bunların çürümesiyle oksijen miktarı azalır , karbondioksit ve hidrojen artar, pH azalarak deniz suyunun asidik değerinde artış olur. Oksijendeki azalmanın korozyon hızında bir azalmaya neden olması beklenirken gerçekte bu olmaz. Bunun nedeni mikrobiyolojik korozyonun daha şiddetle ortaya çıkmasıdır. Özellikle yüksek hidrojen sülfür oluşumu korozyon için son derece etkilidir. Haliç, kirliliğin ve asidik özelliğin aşırı yaşandığı bir ortam olduğundan, çok koroziv olarak tanımlanabilir.

6.5.2. Zemin ortamının korozivlik değerlendirilmesi

4. Bölüm'de geniş olarak anlatıldığı üzere zemindeki korozyonu etkileyen ve belirleyen faktörler şunlardır.

- Toprağın yapısı
- Zeminin pH derecesi
- Zeminin rezistivitesi

- Redoks potansiyeli
- Oksijen yoğunluğu
- Mikroorganizmalar

Katodik koruma uygulanacak ayaklardan P3 ve P6 grubu hemen deniz kıyısında olduğundan ve yer altı suyu 1 m'den itibaren başladığından özellikle yüzeyden 8 metre aşağıya kadar dolgu zemin olması sebebiyle toprağın yapısı genelde rutubetlidir. Bu durum zeminin rezistivitesini de azaltmaktadır. Bu sebeple rezistivite açısından kıyıdaki çelik ayaklar korozyona uygun zeminedir, denilebilir.

Toprağın normal pH değeri 5-8 arasındadır. Nitekim Haliç ortamında toprakta yapılan etütlerde pH 7,04 ile 7,89 arasında bulunmuştur. Bu aralıkta korozyon hızı üzerinde pH'ın etkisi hemen hemen yoktur. Korozyon hızı genellikle oksijen difüzyon hızının kontrolü altındadır.

Rezistivite düştükçe zeminin koroziflik özelliği artar, metal yüzeyinde oluşan korozyon hücrelerinin daha küçük potansiyel farklarında bile etkili olmasına ve korozyon akımının artmasına neden olur. Haliç ortamında yapılan etütlerde rezistivite P3 için yüzeyde 385-540 ohm.cm, 2 m ve daha aşağıda 37-703 ohm.cm, P6 için ise yüzeyde 416-1494 ohm.cm, derinlerde ise 87-1205 ohm.cm arasında değişmektedir. Buradan anlaşılabileceği üzere P6 ayak bölgesi üzerindeki rezistivite P3'e göre daha yüksektir. Yani P3 ayak bölgesi korozyona daha müsaittir. Bunun nedeni P6'daki yapay dolgu katmanının daha az olması yani toprağın su geçirgenliğinin daha düşük olması olarak nitelendirilebilir. Haliç zemini, P6'daki bazı katmanlar hariç $\rho < 100$ ohm.cm olduğundan çok korozif olarak tanımlanabilir.

Çözünmüş oksijen konsantrasyonu arttıkça, redoks potansiyeli de artar, düşük oksijen içeren zeminlerde redoks potansiyeli düşüktür. Haliç ortamında redoks potansiyeli -43 ile -53 mV arasında değişmektedir. Çizelge 4.6'daki değerler kullanılırsa Haliç, redoks potansiyeli açısından da çok korozif bir ortam olarak tanımlanabilir.

Oksijen konsantrasyonu zemin içinde yürüten katodik reaksiyon için gereklidir. Zemin içerisine oksijen, havadan ve çözünmüş olarak yer altı suyundan nüfus eder. Zeminin havalanabilmesi zeminin cinsine bağlıdır. P3 ve P6'nın ilk yedi metrelik kısımları yapay

7. HALIÇ KÖPRÜSÜ KATODİK KORUMA SİSTEMİNİN PROJELENDİRİLMESİ

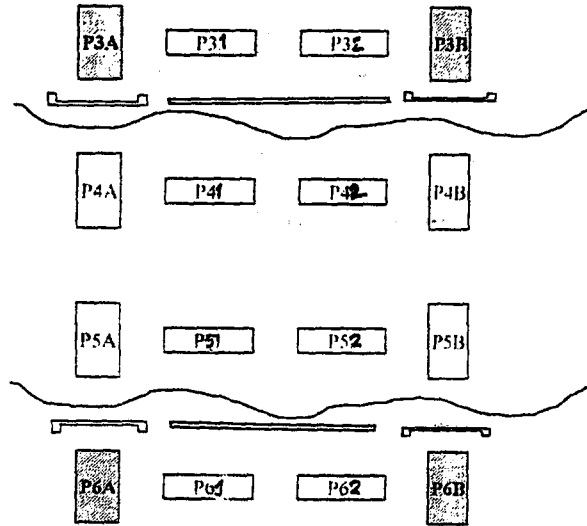
7.1. Ön Tasarım

Haliç Köprüsünün katodik koruma projelendirilmesine başlamadan önce çelik köprüleri, katodik koruma uygulanacak çelik kazıkları ve palplanşları tanımak amacıyla bir ön tasarım gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımın yapılmasının amaçları ve faydaları şöyle sıralanabilir.

- Çelik köprülerin yer ve konum olarak tanıtılması
- Çelik kazıkların konumların, sayılarının ve özelliklerinin belirlenmesi
- Yapılacak işin genel prensiplerinin belirlenmesi
- Etüt sonuçlarının bir araya toplanarak ve literatürdeki akım ihtiyacı miktarları kullanılarak ortalama akım ihtiyacının belirlenmesi
- Katodik koruma sisteminde kullanılacak anod, referans elektrod, T/R ünitesi, bilgisayar vb. gibi her tür malzemenin kapasitelerinin ve sayılarının ortalama olarak belirlenmesi
- Kullanılacak elektrik enerjinin kapasitesinin test edilmesi

7.1.1. İşin tanımı

Karayolları Genel Müdürlüğü, sorumluluğundaki Mevcut Haliç Köprüsü ve yeni tesis edilen A ve B çelik köprülerindeki P3, P4, P5, P6, P4A, PAB, P5A, P5B ayaklarındaki çelik kazıkların ve palplanşların katodik koruması gerçekleştirilecektir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 Haliç Köprüsü ayaklarının yerleşim planı

Katodik koruma prensibi şu şekilde olacaktır.

- a)P3, P4, P5 ve P6 ayak gruplarının her biri için uygun sayıda T/R ünitesi kullanılacaktır.
- b)Koruması yapılacak ayakların yakınına uygun teknikte yeterli sayıda anot yerleştirilecektir.
- c)T/R ünitelerinin kumandası P3 ayağı yakınına tesis edilen kontrol odasından yapılacaktır. Kontrol otomatik ve manuel olarak yapılabilecektir.
- d)Koruması yapılacak çelik ayakların yakınına uygun teknikte ve yeterli sayıda referans elektrodu yerleştirilecektir. Referans elektrotlarından alınan bilgiler kontrol odasına ulaştırılarak gelen bilgiler neticesinde haberleşme kabloları yardımıyla T/R üniteleri kontrol odasından ayarlanabilecektir.

7.1.2. Koruyucu akım miktarı

Koruyucu akım yoğunluğu olarak ön tasarımda aşağıdaki değerler seçilmiştir.

Deniz bataklığında	: 0,0175 A/m ²
Deniz kıyısında	: 0,0480 A/m ²
Deniz ve deniz bataklığı karışımında	: 0,0250 A/m ²
Kil içerisinde	: 0,0100 A/m ²
Kilden aşağıdaki zeminde	: 0,005 A/m ²

Bu akım yoğunluğu değerleri kullanılmak suretiyle ayak gruplarının toplam akım ihtiyacı,

P3 Ayak Grubu için : 44,283 A

P6 Ayak Grubu için : 50,388 A

P4 Ayak Grubu için : 90,840 A

P5 Ayak Grubu için : 97,535 A

olarak hesaplanmıştır.

Hesabın ön tasarım hesabı olması sebebiyle akım yoğunluğu değerleri yüksek seçilmiş ve akım ihtiyacı sonuçlarının toleranslı bir şekilde yüksek çıkmasına dikkat edilmiştir.

7.1.3. Ön tasarım proje hesabı

Ön tasarım proje hesabında örnek olarak magнетit anot seçilmiş bu anodların deniz suyu içerisinde 10 A, toprak içerisinde ise 3 A akım çektiği öngörülmüştür. Bu akım miktarlarına göre anot miktarları,

P3 için = 16 Adet

P4 için = 10 Adet

P6 için = 16 Adet

P5 için = 10 Adet

bulunmuştur.

Karadaki ayaklar için anod yatağı derinliği (karada) 58 m, toplam anod yatağı direnci 0,114 ohm, P3 ayağının toprağa geçiş direnci 0,183 ohm, P6 ayağının toprağa geçiş direnci ise 0,179 ohm olarak hesaplanmıştır.

T/R ünitelerinin %70 verimle çalışacağı varsayımından hareketle akım ve voltaj kapasiteleri

P3 için 63,261 Amper , 11,5 Volt

P6 için 71,983 Amper , 12,884 Volt

P4=P5 için 124,85 Amper , 4,4 Volt hesaplanmıştır. Buna göre :

Karadaki P3 ve P6 ayaklarının T/R kapasiteleri standart olarak 50 V – 80 Amper, denizdeki P4 ve P5 ayaklarının T/R kapasiteleri ise 50 V – 150 Amper olarak seçilmiştir.

7.2. Korunacak Çelik Kazıkların Tanıtılması

7.2.1. Korunacak çelik kazık ölçüleri

Haliç köprülerini taşıyan eski ve yeni tüm çelik kazıkların boyutları aşağıda Çizelge 7.1’de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 7.1 Haliç Köprülerini taşıyan ve korunacak çelik kazık boyutları

AYAK ADI		KAZIK SAYISI (Adet)	KAZIK ÇAPI (mm)	KAZIK DERİNLİĞİ (m)			Palplanş Yüzey Alanı (m ²)
				Min.	Max.	Ort.	Ort.
P3	P31 (eski)	14	762			41,55	
	P32 (eski)	14	762			41,55	
P6	P61 (eski)	15	762			58,54	
	P62 (eski)	15	762			58,54	
P4	P4A (yeni)	14	1014	56,52	57,00	56,70	
	P4B (yeni)	14	1014	57,98	59,20	58,50	
	P41 (eski)	18	914			58,69	
	P42 (eski)	18	914			58,69	
P5	P5A (yeni)	14	1014	63,16	63,76	63,46	
	P5B (yeni)	14	1014	64,32	65,53	64,92	
	P51 (eski)	18	914			65,45	
	P52 (eski)	18	914			65,45	
Palplanş (P3)							500
Palplanş (P6)							500

7.2.2. Korunacak çelik kazık derinlikleri

Kazıkların zemin içerisindeki farklı katmanlardaki derinliklerini bulabilmek için 6. Bölüm Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’ deki jeolojik plan kullanılmış, her zemindeki ortalama kazık derinlikleri aşağıda Çizelge 7.2’ ye çıkarılmıştır.

Çizelge 7.2 Çelik kazıkların zemin içerisindeki derinlikleri

AYAK ADI	Ortalama kazık derinliği (m)	Çamurdaki derinlik (m)	Kildeki derinlik (m)	Zemindeki derinlik (m)
P3	41,55	5	27	9,55
P6	58,40	5	40	13,40
P4	58,14	8	32	18,14
P5	64,82	8	40	16,82

7.2.3. Korunacak çelik kazıkların yüzey alanları

Yukarıdaki Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’deki çelik kazık ölçüleri kullanılarak projelendirme için gerekli olan kazıkların toplam yüzey alanı hesaplanacaktır.

$$\text{Toplam Kazık Yüzey Alanı} = (\pi \cdot R \cdot h) \cdot n \quad (7.1)$$

Burada, R = Kazık çapı (m)

h = Kazık derinliği (m)

n = Kazık sayısı (adet) ‘dır.

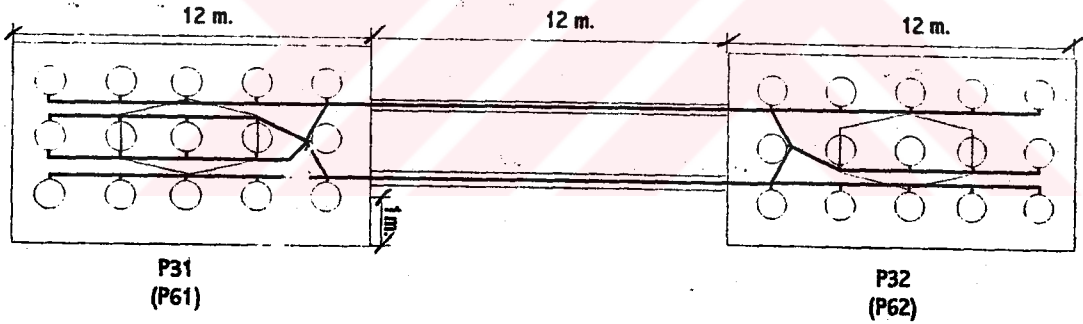
Palplanşların yüzeyinin çok fazla girintili çıkıntılı olması sebebiyle ve hassas bir yüzey alanı hesabı yapmanın zorluğu yüzünden palplanşların ortalama yüzey alanı ortalama 500 m² olarak öngörülmüştür. Kazıkların hesaplanan ayrı ayrı ve toplam yüzey alanları Çizelge 7.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.3 Korunacak çelik kazıkların yüzey alanları

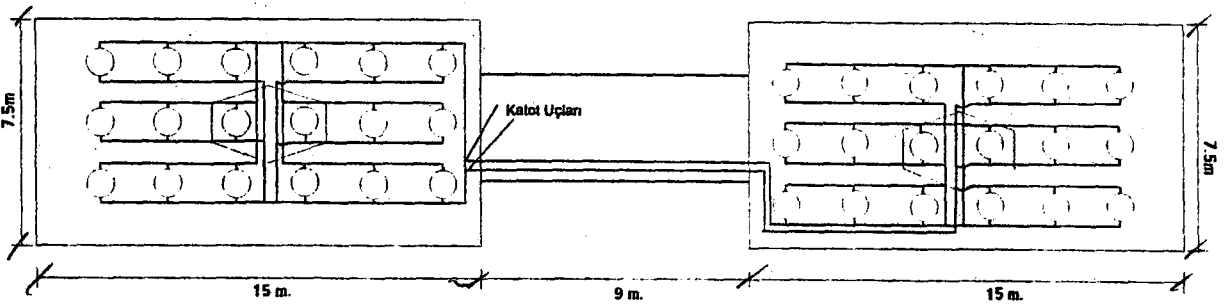
AYAK ADI	Kazık Sayısı (adet)	Kazık Çapı (mm)	Ortalama Kazık Derinliği (m)	Yüzey Alanı (m ²)		
				Çamurda	Kilde	Zeminde
P3 ayak grubu	28	762	41,55	334,9	1808,8	639,8
P6 ayak grubu	30	762	58,40	358,9	2871,2	961,8
P4 ayak grubu (eski)	36	914	58,14	826,5	3306,1	1874,1
P4 ayak grubu (yeni)	28	1014	58,14	713,2	2852,8	1617,1
P5 ayak grubu (eski)	36	914	64,82	826,5	4132,7	1737,8
P5 ayak grubu (yeni)	28	1014	64,82	713,2	3566	1499,5
P3 palplanş				500		
P6 palplanş				500		

7.2.4. Korunacak çelik kazıkların kazık başlığı içindeki katod bağlantıları

Eski köprülerin kazıklarının arasındaki katod bağlantıları 1972 yılındaki inşaat esnasında gerçekleştirilmiş ve katod uçları dışarıya çıkarılmıştır. Kazık başlıkları betonla kapatıldığından dolayı eski köprülerin kazıkları arasındaki kablo bağlantıları Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te görülmektedir.



Şekil 7.2 P3 ve P6 (eski) ayak grubunda kazıklar arasındaki katod bağlantıları



Şekil 7.3 P4 ve P5 (eski) ayak grubunda kazıklar arasındaki katod bağlantıları

burada çeşitli deneyler yapıldı ve muhtelif yerlerden literatür bilgileri kullanıldı. Bunları sıralamak gerekirse,

1972'deki projelendirme esnasındaki literatür bilgileri kullanılmıştır.

- Eski katodik koruma sisteminden 1972-1989 yılları arasında elde edilen akım ölçmeleri kullanılarak fiili akım yoğunluğu hesaplanmıştır.
- 1972'deki projelendirmede kullanılan literatür bilgileri ile sistem çalışırken ölçülen (madde 2) akımlar arasındaki fark hesaplanarak, yeni sistem projelendirilmesinde kullanmak üzere, literatür bilgileri ile gerçek durum arasındaki % sapma hesaplanmıştır.
- Yeni projelendirme için son zamanlardaki literatür bilgileri kullanılmıştır.
- P6 ayağı yönündeki P9 ayağında polarizasyon kırılma yöntemi kullanılarak deney çalışması yapılmıştır.
- 4 ve 5. maddeler neticesinde elde edilen akım yoğunluğu miktarına eski sistem incelenmesinden elde edilen % sapma miktarı uygulanarak gerçek akım yoğunluğu hesaplanmıştır. Ancak gerçek akım yoğunluğu yerine yeni sistem projelendirmesi esnasında literatür bilgileri kullanılmış yalnızca T/R kapasiteleri toleranslı seçilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde yukarıda anlatılanları bölümler halinde inceleyeceğiz.

7.3.1. Eski katodik koruma sisteminde akım ihtiyacı tespiti

7.3.1.1. Literatür yardımı ile akım ihtiyacı tespiti

1972'de eski katodik koruma sistemi tesis edilirken aşağıdaki Çizelge 7.4'de gösterilen akım yoğunluğu miktarları kullanılmıştır.

Çizelge 7.4 Eski sistemde seçilen akım yoğunluğu

AYAK ADI	Akım Yoğunluğu (mA/m ²)			
	Deniz Suyu	Deniz Zemini	Kara Yüzeyi	Kara Zemini
P4 ve P5	80	6	--	--
P3 ve P6	--	--	10	6

Çizelge 7.5 Eski köprü çelik kazık ölçüleri

AYAK ADI	P3	P4	P5	P6
Kazık Çapı (m)	76,20	91,44	91,44	76,20
Kazık Uzunluğu (m)	41,55	58,69	65,45	58,54
Kazık Sayısı (adet)	28	36	36	30

Çizelge 7.4 ve Çizelge 7.5'deki bilgiler kullanılarak korunacak çelik kazıkların yüzey alanı ve akım ihtiyacı belirlenebilir. Hesaplanan değerler Çizelge 7.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 7.6 Eski köprünün akım ihtiyacı tespit sonuçları

AYAK ADI	Yüzey Alanı (m ²)		Akım İhtiyacı (A)		Toplam Akım (A)
	Denizde	Zeminde	Denizde	Zeminde	
P3	--	2728	--	27,3	27,3
P4	341	5490	27,3	32,9	60,2
P5	341	6188	27,3	37,1	64,4
P6	--	4143	--	41,4	41,4

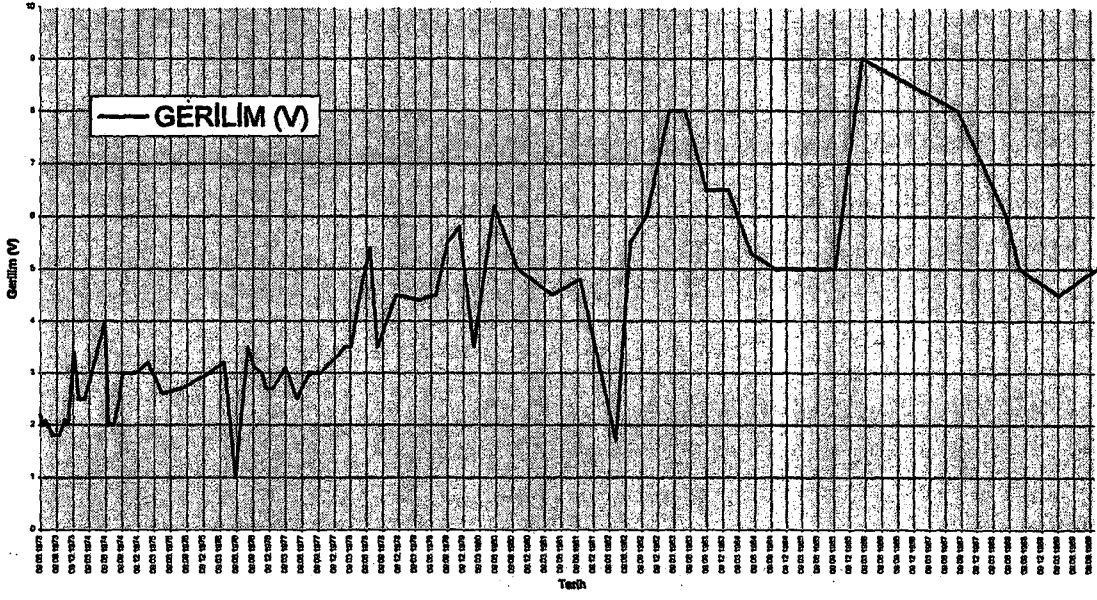
7.3.1.2. 1972-1989 yılları arasındaki ölçmeler yardımıyla akım ihtiyacı tespiti

Eski katodik koruma sisteminden 1972-1989 yılları arasında elde edilen akım ve gerilim değerleri çizelge ve akım gerilim grafikleri halinde aşağıda verilmektedir

Çizelge 7.7 P3 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım-potansiyel değişimi

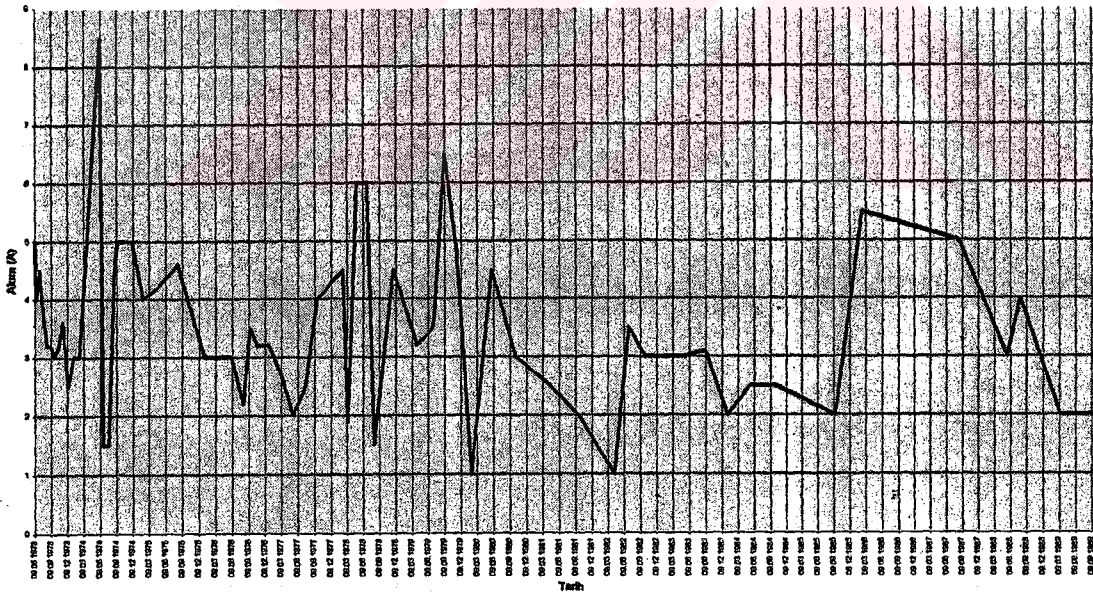
TARİH	TRAFO-REDRESÖR ÜNİTESİ							
	P3 AYIĞI		P4 AYIĞI		P5 AYIĞI		P6 AYIĞI	
	GERİLİM	AKIM	GERİLİM	AKIM	GERİLİM	AKIM	GERİLİM	AKIM
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
09.06.1973	2,2	5	5	12	4,1	20	2	4
15.06.1973	2	4	4,7	10	4,1	20	1,7	3
22.06.1973	2	4	4,8	12	4,1	21	1,4	2,8
05.07.1973	2,1	4,5	4,5	10	4,5	23	1,4	2,8
19.07.1973	2	4	4,5	11	4	18	1,6	3,2
02.08.1973	1,9	3,6	4,5	12	3,3	10	1	1,2
18.08.1973	1,8	3,2	3,7	5	4,1	20	1,5	3
06.09.1973	1,8	3,2	3,2	4	3,5	15	1,5	2,5
25.09.1973	1,8	3	2,8	3	3,3	10	1,6	2,3
22.10.1973	2,1	3,2	3,5	4	3,8	15	2,1	3
12.11.1973	2	3,6	3,5	4	4,2	18	2,3	3
14.12.1973	3,4	2,5	4,2	5	4,6	9	3,5	4,2
11.01.1974	2,5	3	3,4	5	4	4	3	3,2
12.02.1974	2,5	3	4	5	4	1,8	3	3
06.06.1974	4	8,5	5,6	10	3,5	8	3,7	5
25.06.1974	2	1,5	5,6	15	3,2	10	2	3
25.07.1974	2	1,5	5,5	30	4,5	24	2,2	3
27.08.1974	2,5	4,5	5,3	25	4,4	22	2	2,5
12.09.1974	3	5	5,2	24	3,4	22	3,8	6
02.12.1974	3	5	5,6	22	4,3	19	2,5	3
03.02.1975	3,2	4	6,4	6	4,5	5	1,8	1,2
25.04.1975	2,6	4,2	4,7	18	3,8	12	2,4	3
13.08.1975	2,7	4,6	4,7	21	3,8	15	2,1	3,2
09.01.1976	3	3	6	22	5,2	20	2,5	3
01.04.1976	3,2	3	6,2	22	5,8	21	2,2	1,9
04.06.1976	1	3	4	25.06	4	25	2,5	0,2
11.08.1976	3,5	2,2	3,4	24,5	6	27,5	2,5	0,2
16.09.1976	3,1	3,5	5	23	5,6	3,4	2,5	5
27.10.1976	3	3,2	5,3	20,2	6,2	33	3,2	4
20.11.1976	2,7	3,2	8,2	24,8	8,3	22	2,4	2,2
29.12.1976	2,7	3,2	8,2	24,8	10,8	26,2	2,4	2,2
09.03.1977	3,1	2,7	4,8	12	3,4	22	1,8	1
13.05.1977	2,5	2	5	18	3,5	22	2	1,8
20.07.1977	3	2,5	4,4	22	3,4	24	1,6	1,6
22.09.1977	3	4	4,4	22	5,6	34	1,9	1,6
13.Şub	3,5	4,5	6,5	15	5,8	23	3,9	4
13.03.1978	3,5	1,9	6	21	3,7	24	2,5	1,1
03.05.1978	4,5	6	5	18	7,3	30	3	1,5
30.06.1978	5,4	6	5,8	22	5,5	22	3,2	2
10.08.1978	3,5	1,5	2,5	15	3,8	10	3	0,9
24.11.1978	4,5	4,5	5,4	22	3,8	5	3	1
05.04.1979	4,4	3,2	3,5	10	3,8	7	4,1	3
06.07.1979	4,5	3,5	3,5	10	3,8	4	2,4	0,8
10.09.1979	5,5	6,5	3,5	10	3,9	5	3,6	3
15.11.1979	5,8	4,8	3,4	10	4	5	3,8	2,1
07.02.1980	3,5	1	3,4	10	3,8	3	3,7	2
28.05.1980	6,2	4,5	3,5	10	3,9	5	3,9	2
09.10.1980	5	3	3,5	10	3,7	5	4	2
21.04.1981	4,5	2,5	3,4	5	3,9	2	3,4	1,5
25.09.1981	4,8	2	3,5	10	5	21	2,4	0,5
15.04.1982	1,7	1	3,5	10	4,8	7	1,6	0,4
05.07.1982	5,5	3,5	3,8	10	3,2	5	2	1,5
05.10.1982	6	3	4,7	20	3	3	3	1,8
08.02.1983	8	3	3,1	10	4,5	5	2,8	0,7
10.05.1983	8	3	3	10	5	10	4,5	2
05.09.1983	6,5	3,1	2,8	10	4,1	10	2,5	0,1
10.01.1984	6,5	2	6	18	4,5	10	4,6	2,1
16.05.1984	5,3	2,5	6	22	4,5	5	5	2
08.10.1984	5	2,5	7	24	5	1,8	5	2
17.09.1985	5	2	6	21	5	10	6	3,5
17.02.1986	9	5,5	4,1	9,2	4	10	3,2	1
20.08.1987	8	5	4	10	5	10	4	2
23.05.1988	6	3	3	10	4,7	10	3,5	1
05.08.1988	5	4	5,8	10	5,2	10	4	2
15.03.1989	4,5	2	5,1	10	3,8	10	5	3
13.10.1989	5	2	3,3	10	4,8	10	4,5	2

P3 GERİLİMİ (ESKİ SİSTEM)



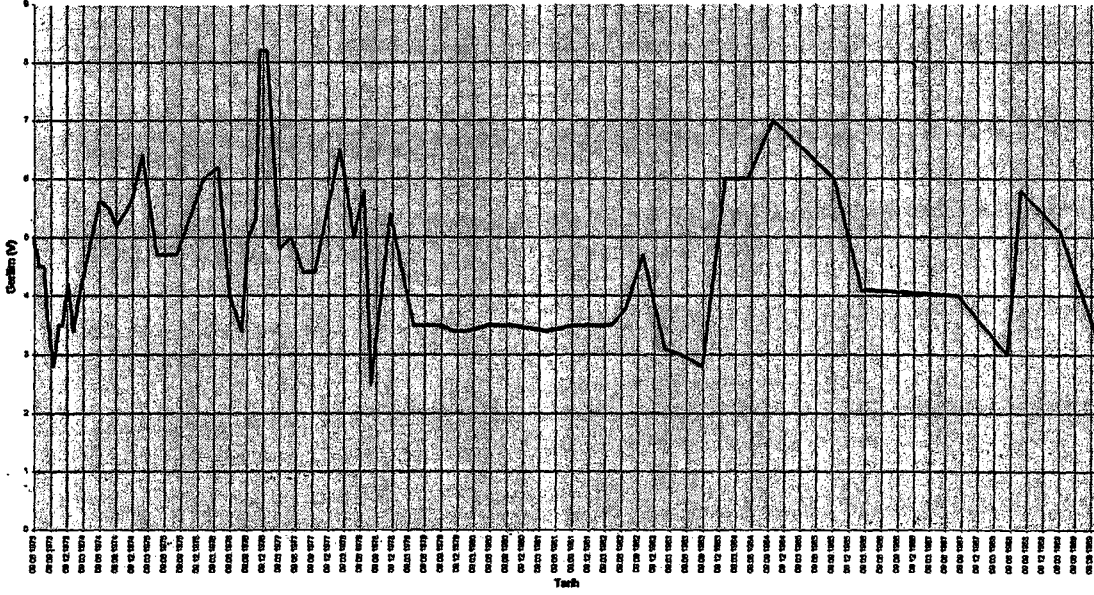
Şekil 7.5 P3 ayağının 1972-1989 arası T/R potansiyel değişimi

P3 AKIMI (ESKİ SİSTEM)



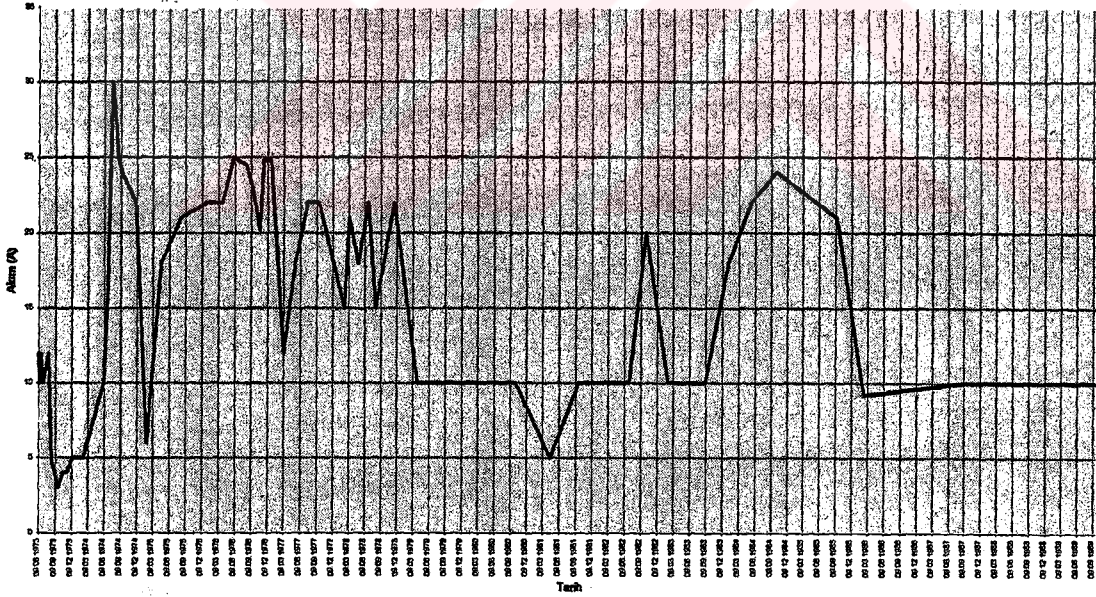
Şekil 7.6 P3 ayağının 1972-1989 arası T/R akım değişimi

P4 GERİLİMİ (ESKİ SİSTEM)



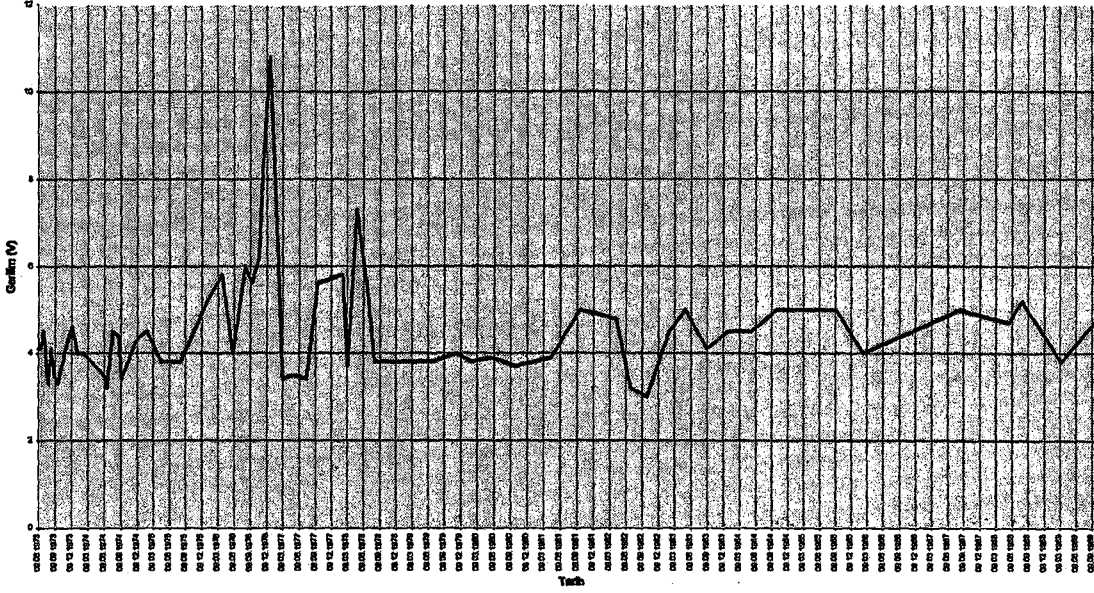
Şekil 7.7 P4 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R potansiyel değişimi

P4 AKIMI (ESKİ SİSTEM)



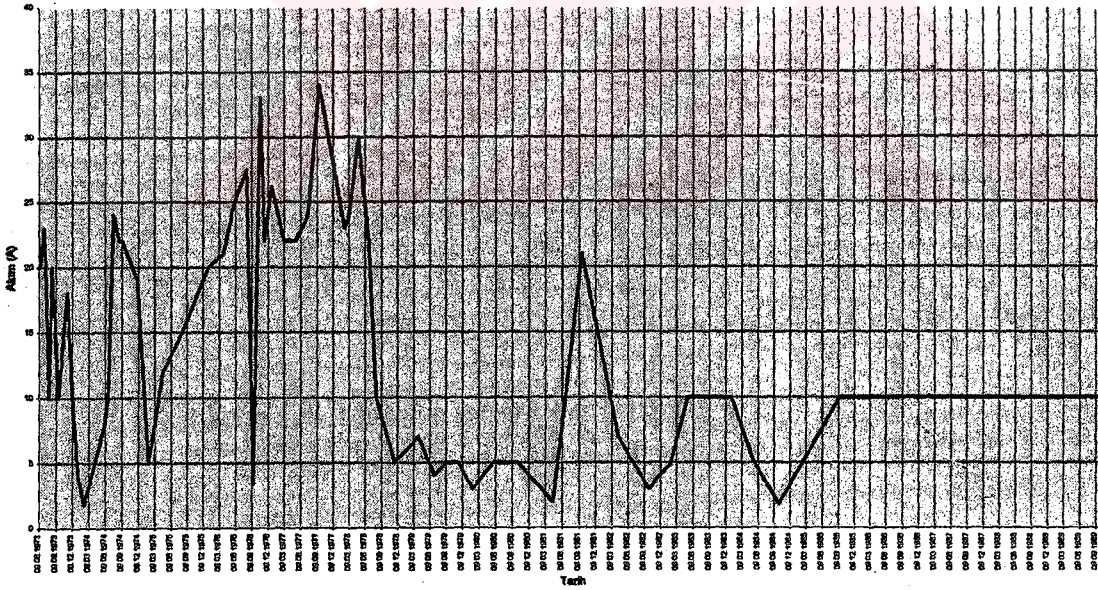
Şekil 7.8 P4 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım değişimi

P5 GERİLİMİ (ESKİ SİSTEM)

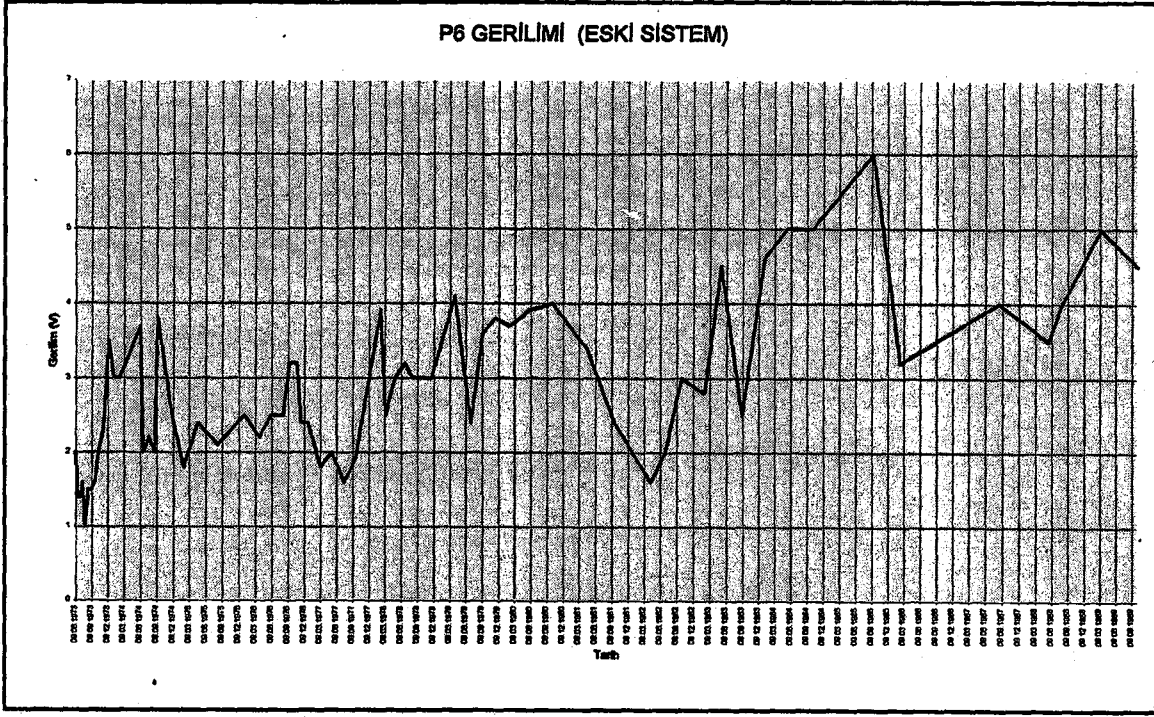


Şekil 7.9 P5 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R potansiyel değişimi

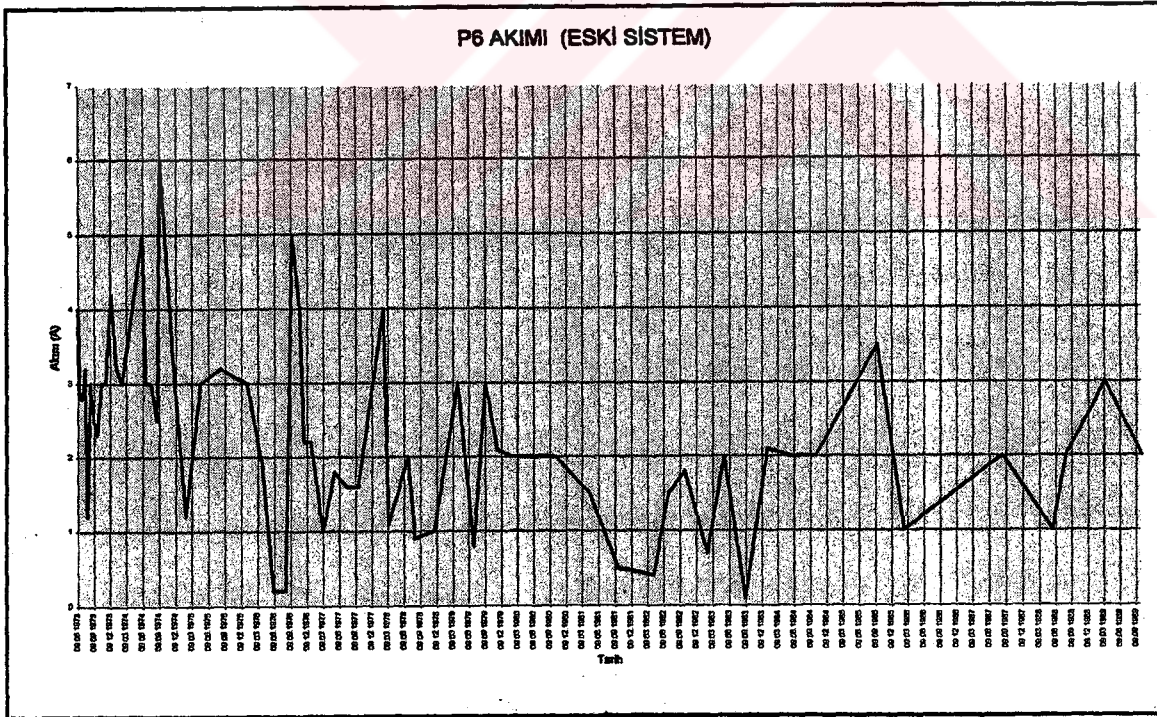
P5 AKIMI (ESKİ SİSTEM)



Şekil 7.10 P5 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım değişimi



Şekil 7.11 P6 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R potansiyel değişimi



Şekil 7.12 P6 ayağının 1972-1989 arasındaki T/R akım değişimi

1972-1989 yılları arasında eski katodik koruma sisteminin yapılan tüm akım-gerilim ölçmeleri incelendiğinde görülmektedir ki, projelendirilen akım değerleri ile ölçmeler sonucu elde edilen fiili akım değerleri arasında farklar bulunmaktadır. Bu farklılığın gerçek miktarı ve % sapma değeri aşağıda hesaplanmıştır.

Çizelge 7.8 Eski köprünün projelendirme ve ölçülen akım miktarları

AYAK ADI	Projelendirme Akımı (A)	Ölçülen Max Akım (A)	Ortalama Akım (A)	Yüzey Alanı (m ²)
P3	27,3	8,5	3,43	2728
P4	60,2	30	14,32	5831
P5	64,4	34	15,84	6529
P6	41,4	6	2,25	4143

Yıllar içinde çekilen max akım kullanılarak tüm ayaklar için fiili akım yoğunluğu hesaplanmak istenirse,

$$\text{Akım Yoğunluğu (mA/m}^2\text{)} = \frac{\text{Ölçülen max.akım (mA)}}{\text{Yüzey alanı (m}^2\text{)}} \quad (7.2)$$

$$\text{P3 için} = 8500 / 2728 = 3,11 \text{ mA/m}^2$$

$$\text{P4 için} = 30000 / 5831 = 5,14 \text{ mA/m}^2$$

$$\text{P5 için} = 34000 / 6529 = 5,2 \text{ mA/m}^2$$

$$\text{P6 için} = 6000 / 4143 = 1,44 \text{ mA/m}^2$$

Projelendirme değerleri ile ölçülen değerler arasındaki % sapma değerleri,

$$\% \text{ sapma} = 100 - \text{Ölçülen max akım (A) / Projelendirme akımı (A)} \times 100 \quad (7.3)$$

$$\text{P3 için : \% sapma} = (100 - (8,5 / 27,3)) \times 100 = \%69$$

$$\text{P4 için : \% sapma} = (100 - (30 / 60,2)) \times 100 = \%54$$

$$\text{P5 için : \% sapma} = (100 - (34 / 64,4)) \times 100 = \%48$$

$$\text{P6 için : \% sapma} = (100 - (6 / 41,4)) \times 100 = \%86 \text{ bulunur.}$$

Projelendirme akım yoğunluğu ile ölçüm sonucu hesaplanan fiili akım yoğunlukları arasındaki farkların çeşitli nedenleri olabilir. Bunlar:

- 1)Projelendirmedeki zemin yapısı ile literatürdeki akım yoğunluğuna karşılık gelen zemin yapısı birbirinin eşdeğeri olmayabilir.
- 2)Eski katodik koruma sisteminde yeteri kadar ve homojen dağılmış anot kullanılmadıysa uygulanan potansiyel çelik kazıkların bazı yüzeylerine etki edememiş ve güç kaynağından yeteri kadar akım çekilememiş olabilir.
- 3)Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi yaklaşık 8 metreden daha derinlerde gerçekten oksijen olmadığı ve buradaki çelik kazıklardan hemen hemen hiç akım çekilmemiş olabilir. Halbuki projelendirmede bu bölgelerin az daha olsa akım çektiği kabul edilmektedir.

7.3.2. Yeni katodik koruma sisteminde akım ihtiyacı tespiti

7.3.2.1. Literatür yardımı ile akım ihtiyacı tespiti

Jeolojik araştırmaların bahsedildiği 7. Bölümlerden anlaşıldığı üzere Haliç Ortamı 3 temel zemin yapısından oluşmaktadır. Bunlar, deniz suyu-deniz bataklığı karışımı, kil ve kilin altındaki zemindir. Her üç katman için literatürden seçilen akım yoğunlukları Çizelge 7.9 gösterilmektedir. (Fukutani, 1984)

Çizelge 7.9 Yeni sistem için seçilen koruyucu akım yoğunlukları

AYAK ADI		AKIM YOĞUNLUĞU (mA/m ²)		
		Deniz Bataklığı	Kil	Zemin
P3	Eski	10	6	5
	Palplanş	20	6	5
P6	Eski	10	6	5
	Palplanş	20	6	5
P4	Eski	20	6	5
	Yeni	20	6	5
P5	Eski	20	6	5
	Yeni	20	6	5

Literatürden tespit edilen bu akım yoğunluklarına göre yüzeyin akım ihtiyacı miktarı hesaplanarak Çizelge 7.10'a çıkarılmıştır.

Çizelge 7.10 Yeni sistem için akım ihtiyacı tespit sonuçları.

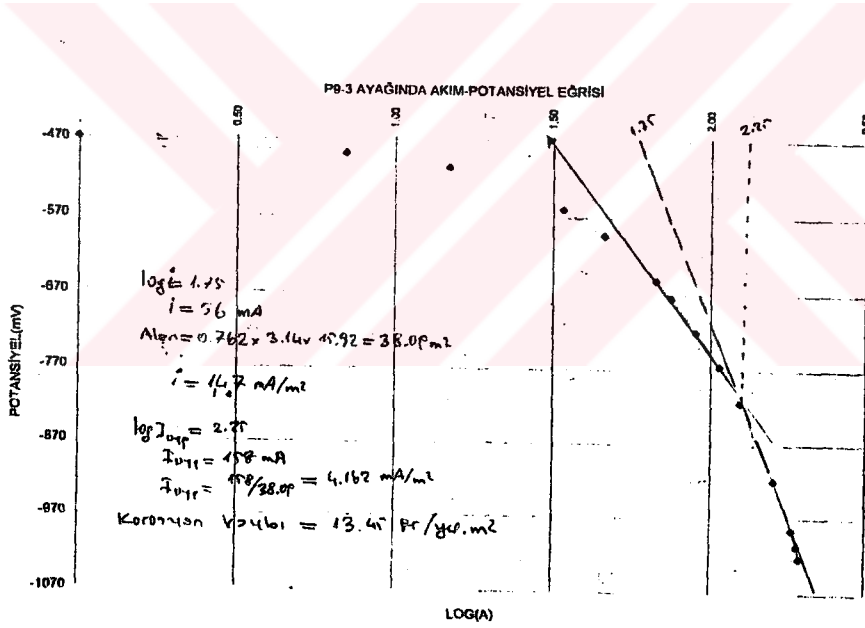
AYAK ADI		AKIM İHTİYACI (A)				TOPLAM (A)
		Deniz Bataklığı	Kilde	Zeminde	TOPLAM	
P3	Eski	4,1	13	3,8	20,9	30,9
	Palplanş	10	--	--	10	
P6	Eski	4,3	20,6	5,7	30,6	40,6
	Palplanş	10	--	--	10	
P4	Eski	16,5	19,8	9,2	45,5	84,8
	Yeni	14,2	17,1	8	39,3	
P5	Eski	16,5	24,7	8,6	49,8	92,8
	Yeni	14,2	21,3	7,5	43	

7.3.2.2. Polarizasyon kırılma yöntemi ile akım ihtiyacı tespiti

Bu bölümde özellikle deniz kıyısında bulunan P3 ve P6 ayaklarının akım ihtiyacını tespit edebilmek amacıyla literatür bilgisi yanında alternatif bir deney yapılmıştır. Deney için P6 ayağından 235 m uzaklığında, deniz seviyesinden 8m yüksekliğindeki P9 ayağı seçilmiştir. Deniz kıyısında bulunan P6 ayağının büyük bölümünün deniz bataklığına benzer bir zemin içerisinde bulunması ve bu zeminin rezistivitesinin de P9'a göre daha düşük olması sebebiyle P9 ayağındaki ölçmelerin P6 ayağındaki akım ihtiyacını tam olarak veremeyeceği açıktır. Ancak P6'nın yanındaki zeminin deniz bataklığı olması ve P6'da çalışmanın zorlukları sebebiyle P9'da deney yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar yaklaşım metodu kullanılarak P6'ya adapte edilebilir. P9. ayağında kazıklar arasında katod bağlantıları bulunmadığından P9 ayağının etrafındaki zemin yaklaşık 2 m derinliğinde kazılmış, çelik kazıklar ortaya çıkarılmış ve çelik kazıklara ölçü aletinin ucu temas ettirilerek katot ucu olarak kullanılmıştır. Kazı yapmak, kazıklardaki paslanma ve korozyon olayını gözle izleme imkanı da verdiğiinden ayrıca yararlı olmuştur. Deney neticesinde elde edilen değerler Çizelge 7.11 ve Şekil 7.13'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.11 Akım-Potansiyel değerleri (Cu/CuSO₄ elektroduna göre)

Akım (mA)	Kazık zemin Potansiyeli (mV)
0	-470
7	-489
15	-507
34	-560
46	-593
67	-652
75	-675
90	-720
107	-765
125	-814
162	-920
186	-986
193	-1008
197	-1024



Şekil 7.13 Polarizasyon kırılma grafiği

Grafikten elde edilen değerler

$\log(i) = 1.75$ ise $i = 56 \text{ mA}$

$\text{Alan} = 0.762 \times 3.14 \times 15.92 = 38.09 \text{ m}^2$

$i = 56 / 38.09 = 1.47 \text{ mA/m}^2$ bulundu.

$\log I_{\text{uyg}} = 2.17$ ise $I_{\text{uyg}} = 158 \text{ mA}$

$I_{\text{uyg}} = 158 / 38.09 = 4.162 \text{ mA/m}^2$

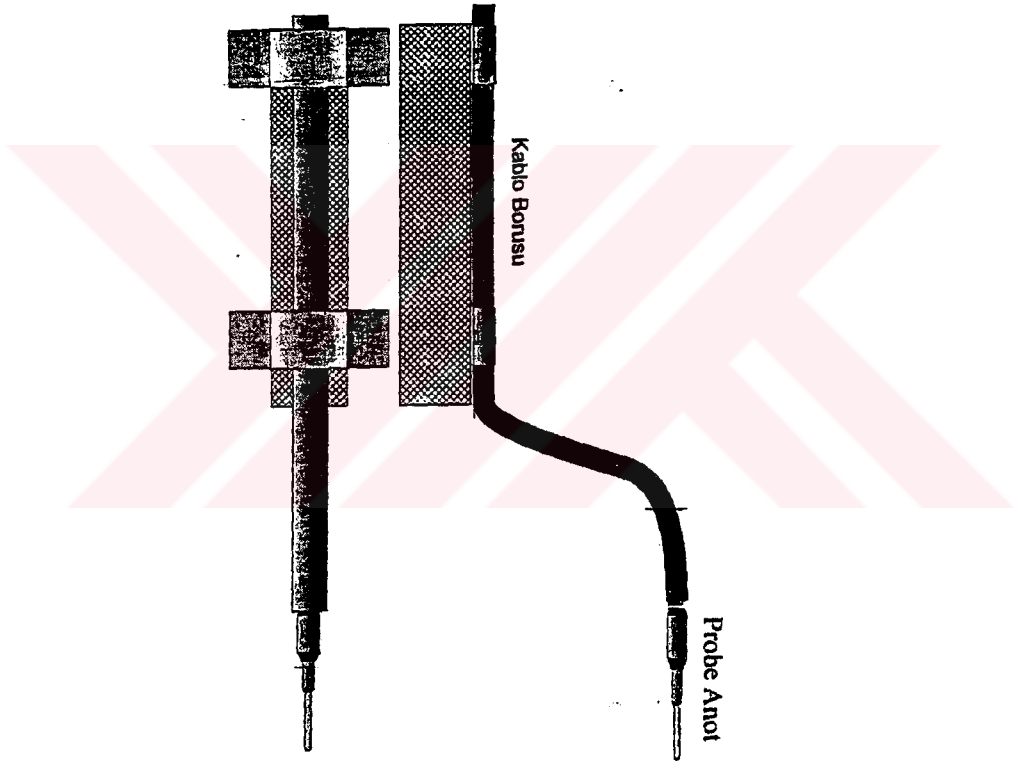
Korozyon Kaybı = $13,45 \text{ gr/yıl.m}^2$ bulunmaktadır.

7.4. Anod Sayısı Tespiti

Yeni katodik koruma sisteminin projelendirilmesinde karma oksit kaplı titanyum anotlar kullanılacaktır. Bu anotlar karışık metal oksit ile kaplı titanyum metalinden oluşmuştur. Projelendirmede derinkuyu anot yatağında 1,6 cm çapında 100 cm uzunluğunda tübüler çoklu anot, deniz suyu içerisinde ise kazık uçlarına monte edilebilen tekli (rot) anot kullanılacaktır. Anotların yıpranması 1 mg/A yıl'dan azdır.

7.4.1. Tek anot akımı ve kullanılacak anot sayısı

Deniz anodlarının görünüşü Şekil 7.14'de gösterilmektedir.



Şekil 7.14 Deniz anodlarının görünüşü

Metal oksit kaplı titanyum anotlardan karada ve denizde çekilebilecek maksimum akımlar,

Karada : 50 A/m^2

Denizde : 500 A/m^2 dir.

Buna göre tek anot tarafından çekilecek akımı hesaplamak istersek,

Kara tarafı anotlar için tek anod akımı

Tüp Anot:

Anot boyu	: 100 cm
Anot çapı	: 1,6 cm
Anot yüzeyi	: $3,14 \cdot D \cdot L$
Anot yüzeyi	: $3,14 \cdot 1,6 \cdot 100$
Anot yüzeyi	: $502,4 \text{ cm}^2 = 0,05024 \text{ m}^2$
Tek anod akımı	: Anot Yüzeyi (m^2) . Karada çekilen akım (A/m^2)
Tek anod akımı	: $0,05024 \cdot 50$:2,5 A/Tek Anot

Deniz tarafı anotları için tek anod akımı

Anot boyu	: 22,8 cm
Anot çapı	: 1,91 cm
Anot yüzeyi	: $3,14 \cdot D \cdot L$
Anot yüzeyi	: $136 \text{ cm}^2 = 0,0136 \text{ m}^2$
Tek anod akımı	: Anot Yüzeyi (m^2) . Karada çekilen akım (A/m^2)
Tek anod akım	: $0,0136 \cdot 500 = 6,8 \text{ A/Tek Anot}$ elde edilir.

Bulunan tek anod akımları kullanılarak projelendirme için gerekli anod sayısı hesaplanabilir.

Projede gerekli anod sayısı

P3 için koruyucu akım miktarı	: 30,9 A
Bir anodun verdiği akım	: 2,5 A
P3'de kullanılan anod sayısı	: $30,9 / 2,5 = 13$ Adet
Homojen dağılım için anod sayısı	: 11 Adet

P6 için koruyucu akım miktarı	: 40,6 A
Bir anodun verdiği akım	: 2,5 A
P6'da kullanılan anod sayısı	: $40,6 / 2,5 = 16$ Adet
Homojen dağılım için anod sayısı	: 14 Adet

P4 için koruyucu akım miktarı	: 84,8 A
Bir anodun verdiği akım	: 6,8 A

P4'de kullanılan anot sayısı : $84,8 / 6,8 = 13$ Adet

Homojen dağılım için anot sayısı : 18 Adet

Bulunan anot sayıları ihtiyacı Çizelge 7.12'de toplu olarak gösterilmektedir.

Çizelge 7.12 Projeler için gerekli anot sayıları

AYAK ADI		Kazık Toplam (A)	Tek Anottan Çekilen Akım (A)	Hesaplanan Anot Sayısı (Adet)	Homojen Akım Dağılımı İçin Gerekli Anot Sayısı (Adet)	Eklenen-Çıkarılan Anot Sayısı (Adet)
P3	Mevcut PP	30,9	2,5	13	11	-2
P6	Mevcut PP	40,6	2,5	16	13	-3
P4	Mevcut Yeni	84,8	6,85	13	18	+5
P5	Mevcut Yeni	92,8	6,85	14	18	+6

7.5. DC Devre Dirençleri

DC devre dirençleri aşağıda sıralanan dirençlerin toplamından oluşmaktadır.

- Anot yatağı direnci
- Anod yatağı – zemin geçiş direnci
- Anodların iç direnci
- Kablo dirençleri
- T/R ünitesi ile çelik kazık arasındaki kabloların dirençleri
- T/R ünitesi ile anot yatağı arasındaki kabloların dirençleri
- Çelik kazık ve palplanşların zemine geçiş dirençleri

7.5.1. P3 ayak grubunun DC devre dirençleri

7.5.1.1. P3 anot yatağı direnci

- Anot yatağı – Zemin geçiş direnci

İnaktif derinlik: 10 m (Şekil 7.13'den)

Anod sayısı: 11

Anod dolgulu boyu: 3 m

Anot yatağı derinliği: $3 \cdot 11 = 33$ m

Aktif toplam anot y.derinliği: $33 + 10 = 43$ m

Bu derinlikte derinkuyu anod yatağı direnci (Anod yatağı + zemin geçiş direnci) Bölüm 5'da verilen (5.7)

$$R_A = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\ln \frac{8 \cdot L}{D} - 1 \right) \quad \text{Formülü ile bulunur.}$$

Burada,

$$\rho = 200 \text{ ohm.cm.} \quad (\text{Anod yatağının 10 m'den sonraki bölgelerde ortalama rezistivitesi})$$

$$L = 4300 \text{ cm} \quad (\text{Anot yatağı boyu})$$

$$D = 22 \text{ cm} \quad (\text{Anod yatağı çapı}) \text{ 'dır.}$$

Bu değerler yukarıdaki formülde yerine konulursa anod yatağı direnci,

$$R_A = 0,047 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

• **Anodların iç direnci (Anod metali – kok dolgu geçiş direnci)**

Anodların iç direnci Bölüm 5'da verilen (5.7)

$$r = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot n} \left(\ln \frac{8 \cdot L}{D} - 1 \right) \quad \text{formülü ile bulunur.}$$

Burada,

$$\rho = 50 \text{ ohm.cm} \quad (\text{Kok tozu rezistivitesi})$$

$$L = 100 \text{ cm} \quad (\text{Anot boyu})$$

$$D = 1,6 \text{ cm} \quad (\text{Anot çapı})$$

$$n = 11 \text{ adet} \quad (\text{Anot sayısı}) \text{ dir.}$$

Bu değerler(5.7) eşitliğinde yerine konulursa anotların iç derinci,

$$r = 0,0377 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

Toplam anot yatağı direnci,

$$R_{A3} = R_A + r = 0,047 + 0,0377$$

$$R_{A3} = 0,0847 \text{ ohm} \quad \text{olarak bulunur.}$$

7.5.1.2. P3 kablo dirençleri

- **T/R ünitesi - Anod yatağı arasındaki kablolar**

Derinkuyu anot yataklarında, anot yatağında oluşabilecek gazdan etkilenmeyecek şekilde anotlarla fabrikasyon bağlantılı $1 \times 16 \text{ mm}^2$ EPR/CSPE kablo kullanılmıştır. Bu kablonun uzunluğu,

T/R ünitesi – Anod yatağı arasında = 20 m

Anot yatağında = 43 m

TOPLAM = 63 m'dir.

Kablonun direnci, aşağıdaki (7.4) eşitliği ile hesaplanır.

$$R_K = \frac{L_K}{K \cdot q} \quad (7.4)$$

Burada,

$L_K = 63 \text{ m}$ (Kablo boyu)

$K = 56 \text{ m/ohm.mm}^2$ (Bakırın öziletkenliği)

$q = 16 \text{ mm}^2$ (Kablo kesiti)

Bu değerler (8.4) eşitliğinde yerine konulursa,

$$R_{KA3} = 63/56.16$$

$$R_{KA3} = 0,070 \text{ ohm}$$

bulunur.

- **T/R ünitesi ile çelik kazık grupları arasındaki kablolar**

Katot bağlantısı yapmak üzere iki adet eski köprü çelik kazık grubuna ve iki adet palplanşa olmak üzere her birine ayrı ayrı $1 \times 50 \text{ mm}^2$ NYY kablo kullanılmıştır.

P31 için :30 m

P32 için :10 m

P_{pp} için :60 m

P_{pp} için :90 m

Bu kabloların dirençleri (7.4) eşitliği yardımıyla hesaplanır. Değerler yerine konularak hesaplama yapılırsa,

$$R_{K31} = 0,0107 \text{ ohm}$$

$$R_{K32} = 0,0035 \text{ ohm}$$

$$R_{KP1} = 0,0214 \text{ ohm}$$

$$R_{KP2} = 0,0321 \text{ ohm}$$

bulunur.

7.5.1.3. P3 Kazık ve palplanşlarının zemine geçiş dirençleri

Akımın zeminden çelik ayağa girdiği noktada T/R ünitesinin “On” durumunda Cu/CuSO₄ referans elektroda göre çelik kazık ile zemin arasındaki potansiyel değerinin kazık üzerindeki boyaya zarar vermemesi ve istenmeyen durumların ortaya çıkmaması için potansiyel değeri 1,2 volt değerinin üzerine çıkmayacağı kabul edilerek projelendirme yapılmaktadır. Her kazık bölgesi için gerekli akım Çizelge 7.13’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.13 P3 ayağında her kazık bölgesi için gerekli akım

AYAK ADI		Toplam akım (A)	Her bir kazık bölgesi için gerekli akım (A)	Kazık toplam Akımı (A)
P3	Eski	20,9	$20,9/2 = 10,4$	30,9
	Palplanş	10	$10/2 = 5$	

Her kazık bölgesinde kazık-zemin potansiyelinin 1,2 Volt’un üzerine çıkmayacağı düşünülerek ve Çizelge 7.13’de akımlar kullanılarak çelik ayakların zemine geçiş dirençleri,

$$R_{Z31} = 1,2 / 10,4 = 0,11 \text{ohm}$$

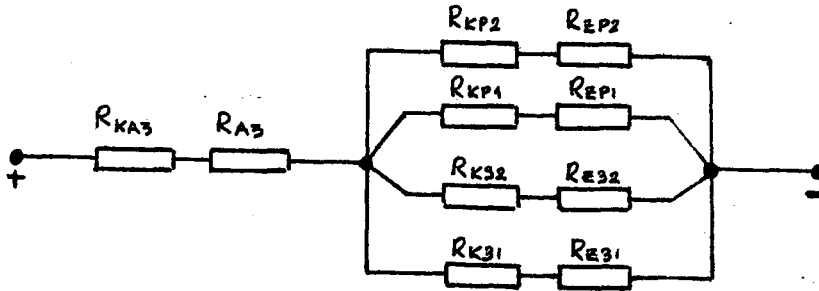
$$R_{Z32} = 1,2 / 10,4 = 0,11 \text{ohm}$$

$$R_{ZP1} = 1,2 / 5 = 0,24 \text{ohm}$$

$$R_{ZP2} = 1,2 / 5 = 0,24 \text{ohm} \quad \text{bulunur.}$$

7.5.1.4. P3 için toplam DC devre direnci

P3 ayak bölgesinin DC devre direncini temsil eden şema Şekil 7.15’de gösterilmektedir. Şekildeki bağlantı formüle edilirse ve hesaplanan ilgili dirençler yerine konulursa toplam DC devre direnci hesaplanabilir.



Şekil 7.15 P3 DC devre direnci temsil şeması

$$R_{T3} = R_{KA3} + R_{A3} + \frac{1}{\frac{1}{R_{KP2} + R_{ZP2}} + \frac{1}{R_{KP1} + R_{ZP1}} + \frac{1}{R_{K32} + R_{Z32}} + \frac{1}{R_{K31} + R_{Z31}}} \quad \text{ise,} \quad (7.5)$$

$$R_{T3} = 0,070 + 0,0847 + \frac{1}{\frac{1}{0,0321 + 0,24} + \frac{1}{0,0214 + 0,24} + \frac{1}{0,0035 + 0,11} + \frac{1}{0,0107 + 0,11}}$$

$R_{T3}=0,1953$ ohm

bulunur.

7.5.2. P6 ayak grubunun DC devre dirençleri

P3 ayak grubu için kullanılan tüm formüller ve hesaplamalar P6 ayak grubu için de kullanılmıştır. Sadece 11 anod yerine P6'da 13 anod kullanıldığından, aktif toplam anot yatağı derinliği = 39+10 = 49 m olarak değişmektedir.

7.5.2.1. P6 anot yatağı direnci

- Anot yatağı zemin geçiş direnci

$$R_A = 0,042 \text{ ohm}$$

- Anotların içi direnci (Anot-Metalik kok dolgu geçiş direnci)

$$r = 0,0319 \text{ ohm}$$

- Toplam anot yatağı direnci

$$R_{A6} = R_A + r = 0,042 + 0,0319 \quad R_{A6} = 0,0739 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

7.5.2.2. P6 Kablo dirençleri

- T/R ünitesi anod yatağı arasındaki kablolar

P3 ayak grubunda kullanılan tüm kablo ölçüleri P6 ayak grubunda aynı şekilde kullanıldığından,

$$R_{KA3} = R_{KA6} = 0,070 \text{ ohm}$$

- T/R ünitesi ile çelik kazık grupları arasındaki kablolar

P3 ayak grubunda kullanılan tüm kablo ölçüleri P6 ayak grubunda aynı şekilde kullanıldığından P3'de bulunan direnç değerleri burada da geçerlidir. Buna göre,

$$R_{K61} = 0,0107 \text{ ohm}$$

$$R_{K62} = 0,0035 \text{ ohm}$$

$$R_{KP1} = 0,0214 \text{ ohm}$$

$$R_{KP2} = 0,0321 \text{ ohm}$$

bulunur.

7.5.2.3. P6 kazık ve palplanşların zemine geçiş dirençleri

Çizelge 7.14 P6 ayağında her kazık bölgesi için gerekli akım

AYAK ADI		Toplam akım (A)	Her kazık bölgesi için gerekli akım (A)	Kazık toplam akımı (A)
P6	Eski	30,6	$30,6/2 = 15,3$	40,6
	Palplanş	10	$10/2 = 5$	

Her kazık bölgesine kazık zemin potansiyelinin 1,2 volt'un üzerine çıkmayacağı düşünülerek Çizelge 7.14'deki akımlar kullanılarak çelik ayakların zemine geçiş dirençleri,

$$R_{Z61} = 1,2/15,3 = 0,07 \text{ ohm}$$

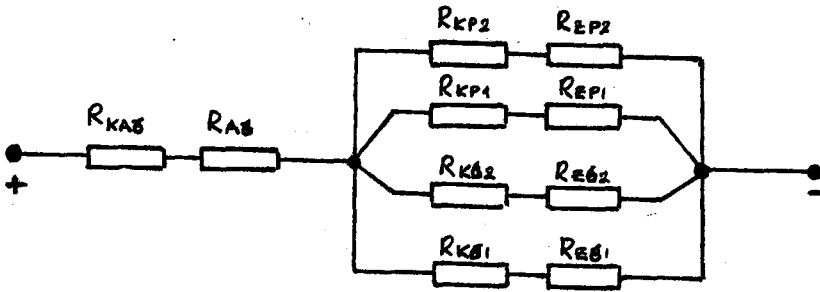
$$R_{Z62} = 7,7/15,3 = 0,07 \text{ ohm}$$

$$R_{ZP1} = 1,2/5 = 0,24 \text{ ohm}$$

$$R_{ZP2} = 1,2/5 = 0,24 \text{ ohm}$$

bulunur.

7.5.2.4. P6 için toplam DC devre direnci



Şekil 7.16 P6 DC devre direnci temsil şeması

P3 için kullanılan (7.5) eşitliğinin aynısı P6 için de kullanılacaktır. P6 ayağı için elde edilen direnç değerleri (7.5) eşitliğinde yerine konulursa,

$$R_{T6}=0,18 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

7.5.3. P4 ayak grubunun DC devre dirençleri

7.5.3.1. P4 anod direnci

Deniz yüzeyinden 2 m aşağıda anod direnci Bölüm 5 'da verilen (5.7) eşitliği ile hesaplanır.

$$\rho=150 \text{ ohm.cm} \quad (\text{Deniz yüzeyinden 2m aşağıdaki ortalama rezistivite})$$

$$L= 22,8 \text{ cm} \quad (\text{Anod boyu})$$

$$D= 1,91 \text{ cm} \quad (\text{Anod çapı}) \text{ ise,}$$

değerler,(6.7) eşitliğinde yerine konularak hesaplama yapılırsa.

$$R_A = 3,72 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

7.5.3.2. P4 kablo dirençleri

- Anotlar ile kazık dağıtım kutuları arasındaki kablolar

Anotlar ile T/R istasyonları arasında anoda fabrikasyon olarak tesbit edilmiş olan 1x16 mm² EPR/CSPE kablolar kullanılmıştır. Bu kabloların ölçüleri şöyledir.

P_{4A} = P_{4B} için

1.Anod	: 15 m
2.Anod	: 13 m
3.Anod	: 6 m
4.Anod	: 14 m
5.Anod	: 15 m

Toplam : 63 m

P₄₁=P₄₂ için

1.Anod	: 15 m
2.Anod	: 13 m
3.Anod	: 6 m
4.Anod	: 15 m

Toplam : 48 m

(7.4) eşitliği kullanılarak ve yukarıdaki kablo uzunlukları eşitlikte yerine konularak her kazık bölgesi için kablo dirençleri,

P_{4A} ve P_{4B} için

$$R_{KAl}=0,0012 \text{ ohm}$$

P₄₁ ve P₄₂ için

$$R_{KAl}=0,0012 \text{ ohm}$$

$$R_{KA2}=0,015 \text{ ohm}$$

$$R_{KA2}=0,015\text{ohm}$$

$$R_{KA3}=0,0067 \text{ ohm}$$

$$R_{KA3}=0,0067\text{ohm}$$

$$R_{KA4}=0,0156 \text{ ohm}$$

$$R_{KA4}=0,0167\text{ohm}$$

bulunur.

$$R_{KA5}=0,0167 \text{ ohm}$$

- **Kazık dağıtım kutuları ile T/R üniteleri arasındaki kablolar**

Kazık dağıtım kutusu ile T/R üniteleri birbirine çok yakın hatta bitişik olarak tesis edildiğinden çok kısa olan aradaki kablonun direnci ihmal edilmektedir.

- **T/R ünitesi ile çelik kazık grupları arasındaki kablolar**

P4A ve P4B kazık bölgesinde

Kazıkların katod bağlantı uçları beton başlık içerisinden dışarıya 2 adet olarak çıkarıldığından T/R ünitesi ile katot arasındaki bağlantıyı yapmak için 2 adet 5 m uzunluğunda $1 \times 50 \text{ mm}^2$ NYY kablo kullanılmıştır.

$$R_{KK1} = R_{KK2} = 5/56.50 \quad R_{KK1} = R_{KK2} = 0,0017 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

P41 ve P42 kazık bölgesinde

P41 kazık bölgesindeki kablo uzunluğu : 30 m ($1 \times 50 \text{ mm}^2$ NYY)

P42 kazık bölgesindeki kablo uzunluğu : 10 m ($1 \times 50 \text{ mm}^2$ NYY) olduğundan (7.4) eşitliği kullanılarak,

$$R_{KK1} = 0,0107 \text{ ohm}$$

$$R_{KK2} = 0,0035 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

7.5.3.3. P4 çelik ayaklarının zemine geçiş direnci

Akımın zeminden çelik ayağa girdiği noktada T/R ünitesinin “On” durumunda Cu/CuSO_4 referans elektroduna göre çelik kazık ile zemin arasındaki potansiyel değerinin 1,2 volt değerinin üzerine çıkmayacağı kabul edilerek projelendirme yapılmaktadır. Her kazık bölgesi için gerekli akım Çizelge 7.15’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.15 P4 ayağında her kazık bölgesi için gerekli akım

AYAK ADI	Toplam Akım (A)		Her kazık bölgesi için gerekli akım (A)	Kazık toplam akımı (A)
P4	Eski	45,5	$45,5/2 = 22,7$	84,8
	Yeni	39,3	$39,3/2 = 19,6$	

Buna göre çelik ayakların zemine geçiş dirençleri 1,2 volt potansiyel değerleri kullanılarak,

$$R_{Z4A} = 1,2 / 19,6 = 0,061 \text{ ohm}$$

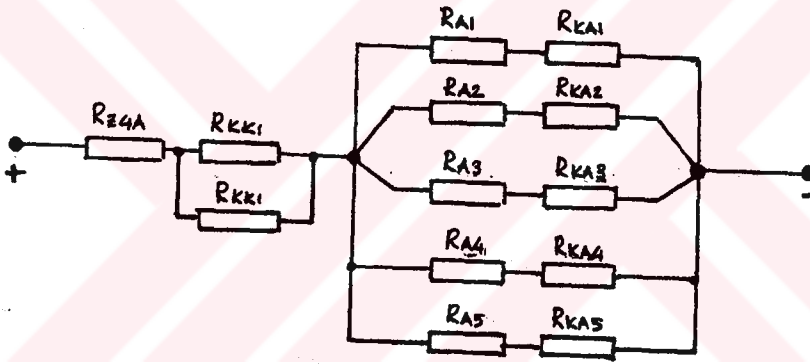
$$R_{Z4B} = 1,2 / 22,7 = 0,052 \text{ ohm}$$

$$R_{Z41} = 1,2 / 22,7 = 0,052 \text{ ohm}$$

$$R_{Z42} = 1,2 / 22,7 = 0,052 \text{ ohm} \quad \text{bulunur.}$$

7.5.3.4. P4 için toplam DC devre direnci

P4A ve P4B kazık bölgesi için



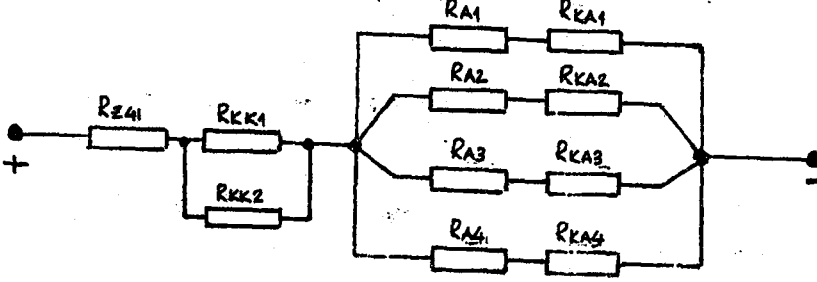
Şekil 7.17 P4A ve P4B DC devre direnci temsil şeması

$$R_{TA} = R_{TB} = R_{Z4A} + \frac{1}{\frac{1}{R_{KK1}} + \frac{1}{R_{KK2}}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{A1} + R_{KA1}} + \frac{1}{R_{A2} + R_{KA2}} + \frac{1}{R_{A3} + R_{KA3}} + \frac{1}{R_{A4} + R_{KA4}} + \frac{1}{R_{A5} + R_{KA5}}}$$

$$= 0,061 + \frac{1}{\frac{1}{0,0017} + \frac{1}{0,0017}} + \frac{1}{\frac{1}{3,72 + 0,012} + \frac{1}{3,72 + 0,015} + \frac{1}{3,72 + 0,0069} + \frac{1}{3,72 + 0,0156} + \frac{1}{3,72 + 0,01}}$$

$R_{TA}=R_{TB}=1,39 \text{ ohm}$ bulunur.

P41 ve P42 kazık bölgesi için



Şekil 7.18 P41 ve P42 DC devre direnci temsil şeması

$$R_{T1} = R_{T2} = R_{Z41} + \frac{1}{\frac{1}{R_{KK1}} + \frac{1}{R_{KK2}}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{A1} + R_{KA1}} + \frac{1}{R_{A2} + R_{KA2}} + \frac{1}{R_{A3} + R_{KA3}} + \frac{1}{R_{A4} + R_{KA4}}}$$

$$= 0,052 + \frac{1}{\frac{1}{0,107} + \frac{1}{0,0035}} + \frac{1}{\frac{1}{3,72 + 0,0012} + \frac{1}{3,72 + 0,015} + \frac{1}{3,72 + 0,0069} + \frac{1}{3,72 + 0,0156}}$$

$R_{T1}=R_{T2}=1,123 \text{ ohm}$ bulunur.

7.5.4. P5 Ayak grubunun DC devre dirençleri

Tüm değerler ve hesaplamalar Bölüm 7.5.3'de P4 ayakları için hesaplanan değerlerin aynısıdır. Bu sebeple burada tekrarlanmayacaktır.

7.6. Trasformatör-Redresör (T/R) Kapasiteleri

7.6.1. P3 ayak grubu T/R kapasitesi

$I = 30,9 \text{ A}$ (Çizelge 7.10'dan akım ihtiyacı)

$R_{T3}=0,1953 \text{ ohm}$ (Bölüm 7.5.1.4'den hesaplanan DC devre direnci)

Trafo-Redresör ünitesi voltaj kapasitesi

$$V = (I \cdot R_{T3}) + 2 \quad (2 \text{ volt T/R ünitesi sürme voltajıdır})$$

$$=(30,9 \cdot 0,1953)+2$$

$$=8,03 \text{ Volt}$$

T/R ünitesinin %70 verimle çalışacağı varsayıldığında kapasiteleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E=8,03 / 0,7 \quad E = 11,47 \text{ Volt}$$

$$I=30,9 / 0,7 \quad I = 44,14 \text{ Amper}$$

7.6.2. P6 ayak grubu T/R kapasitesi

$$I = 40,6 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan Akım ihtiyacı})$$

$$R_{T6}=0,18 \text{ ohm} \quad (\text{Bölüm 7.5.2.4'den hesaplanan DC devre direnci})$$

Trafo-Redresör ünitesi voltaj kapasitesi

$$V =(I.R_{T6})+2 \quad (2 \text{ volt T/R ünitesi sürme voltajıdır})$$

$$=(40,6 \cdot 0,18)+2$$

$$=9,3 \text{ volt}$$

T/R ünitesinin %70 verimle çalışacağı varsayıldığında kapasiteleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E =9,3 / 0,7 \quad E = 13,28 \text{ Volt}$$

$$I =40,6 / 0,7 \quad I = 58 \text{ Amper}$$

7.6.3. P4 Ayak grubu T/R kapasiteleri

$$I =84,8 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan toplam akım ihtiyacı})$$

$$I_{ESKİ} =45,5 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan eski köprü ayakları akım ihtiyacı})$$

$$I_{YENİ} =39,3 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan yeni köprü ayakları akım ihtiyacı})$$

2 adet eski, 2 adet de yeni ayak grubu bulunduğundan her biri hesaplanan akımın yarısı kadar akım çekecektir.

$$I_{41} =I_{42} =45,5 / 2 = 22,75 \text{ A}$$

$$I_{4A} =I_{4B} =39,3 / 2 = 19,65 \text{ A}$$

• P41 ve P42 T/R kapasiteleri

$$I_{41} =I_{42} =22,75 \text{ A} \quad (\text{Hesaplanan akım ihtiyacı miktarı})$$

$$R_{T1} =R_{T2} =1,123 \text{ ohm} \quad (\text{Bölüm 7.5.3.4'den hesaplanan DC devre direnci})$$

Trafo-Redresör üniteleri voltaj kapasitesi

$$V =(I_{41}.R_{T1})+2 \quad (2 \text{ volt T/R ünitesi sürme voltajıdır})$$

$$=(22,75.1,123)+2$$

$$=27,5 \text{ Volt}$$

T/R ünitelerinin %70 verimle çalışacağı varsayıldığında kapasiteleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E=27,5 / 0,7 \quad E = 39,2 \text{ Volt}$$

$$I=22,75 / 0,7 \quad I = 32,5 \text{ Amper}$$

• **P4A ve P4B T/R kapasiteleri**

$$I_{4A}=I_{4B}=19,65 \text{ A} \quad (\text{Hesaplanan akım ihtiyacı miktarı})$$

• $R_{TA}=R_{TB}=1,39 \text{ ohm}$ (Bölüm 7.5.3.4'den hesaplanan DC devre direnci)

Trafo-redresör ünitesi voltaj kapasitesi

$$V =(I_{4A} \cdot R_{TA})+2 \quad (2 \text{ volt T/R ünitesi sürme voltajıdır})$$

$$=(19,65 \cdot 1,39)+2$$

$$=29,31 \text{ Volt}$$

T/R ünitelerinin %70 verimle çalışacağı varsayıldığında kapasiteleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E =29,31 / 0,7 \quad E =41,87 \text{ Volt}$$

$$I =19,65 / 0,7 \quad I =28 \text{ Amper}$$

7.6.4. P5 ayak grubu T/R kapasiteleri

$$I =92,8 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan toplam akım ihtiyacı})$$

$$I_{ESKİ}=49,8 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan eski köprü ayakları akım ihtiyacı})$$

$$I_{YENİ}=43 \text{ A} \quad (\text{Çizelge 7.10'dan yeni köprü ayakları akım ihtiyacı})$$

2 adet eski, 2 adet de yeni ayak grubu bulunduğundan her biri hesaplanan akımın yarısı kadar akım çekecektir.

$$I_{S1}=I_{S2}= 49,8 / 2 = 24,9 \text{ A}$$

$$I_{5A}=I_{5B}= 43 / 2 = 21,5 \text{ A}$$

• **P51 ve P52 T/R kapasiteleri**

$$I_{S1} =I_{S2} = 24,9 \text{ A} \quad (\text{Hesaplanan akım ihtiyacı miktarı})$$

$$R_{T1} =R_{T2} = 1,123 \text{ ohm} \quad (\text{Bölüm 7.5.3.4'den hesaplanan DC devre direnci})$$

Trafo-Redresör ünitesi voltaj kapasitesi

$$V =(I_{S1} \cdot R_{T1})+2 \quad (2 \text{ Volt T/R ünitesi sürme voltajıdır})$$

$$=(24,9 \cdot 1,123)+2$$

$$=30 \text{ Volt}$$

T/R ünitelerinin %70 verimle çalışacağı varsayıldığında kapasiteleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E = 30 / 0,7$$

$$E = 42,8 \text{ Volt}$$

$$I = 24,9 / 0,7$$

$$I = 35,5 \text{ Amper}$$

• P5A ve P5B T/R kapasiteleri

$$I_{5A} = I_{5B} = 21,5 \text{ A} \quad (\text{Hesaplanan akım ihtiyaç miktarı})$$

$$R_{TA} = R_{TB} = 1,39 \text{ ohm} \quad (\text{Bölüm 7.5.3.4'den hesaplanan DC devre direnci})$$

Trafo-Redresör ünitesi voltaj kapasitesi

$$V = (I_{5A} \cdot R_{TA}) + 2 \quad (2 \text{ Volt T/R ünitesi sürme voltajıdır})$$

$$= (21,5 \cdot 1,39) + 2$$

$$= 31,8 \text{ Volt}$$

T/R ünitelerinin %70 verimle çalışacağı varsayıldığında kapasiteleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E = 31,8 / 0,7$$

$$E = 45,4 \text{ Volt}$$

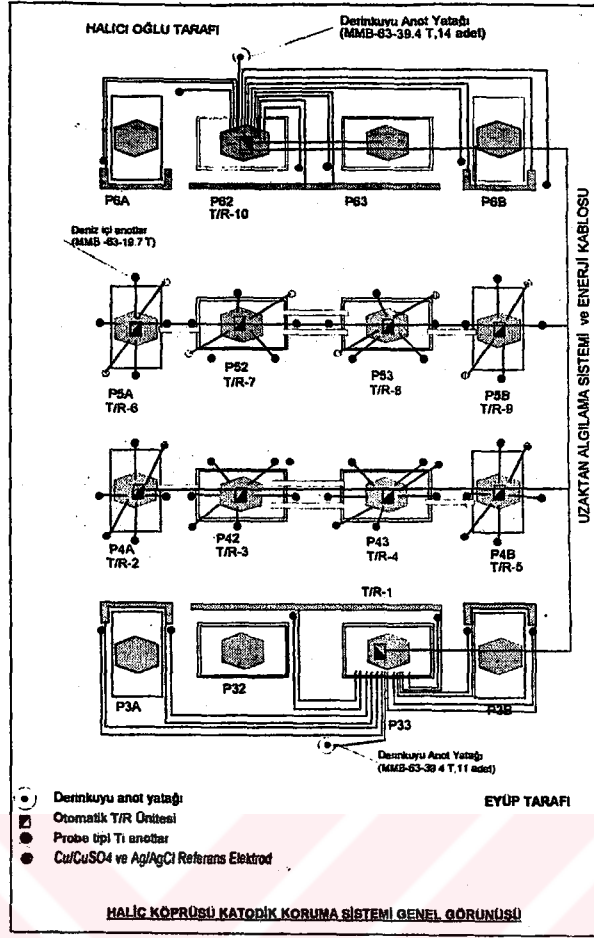
$$I = 21,5 / 0,7$$

$$I = 30,7 \text{ Amper}$$

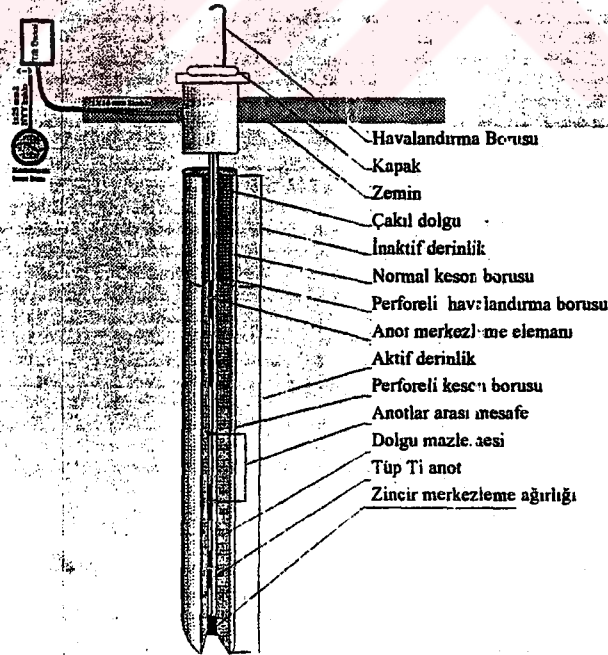
7.7. Anod ve Referans Elektrodların Yerleşim Planı

Anod sayısı hesaplamaları neticesinde her ayak grubu ve ayaklar için gerekli olan anodlar Şekil 7.19 'da görüldüğü gibi homojen bir şekilde dağıtılmış ve deniz içindeki ayaklarda deniz seviyesinin 3 m aşağısına karada ise derinkuyu sistemi ile tesis edilmiştir.

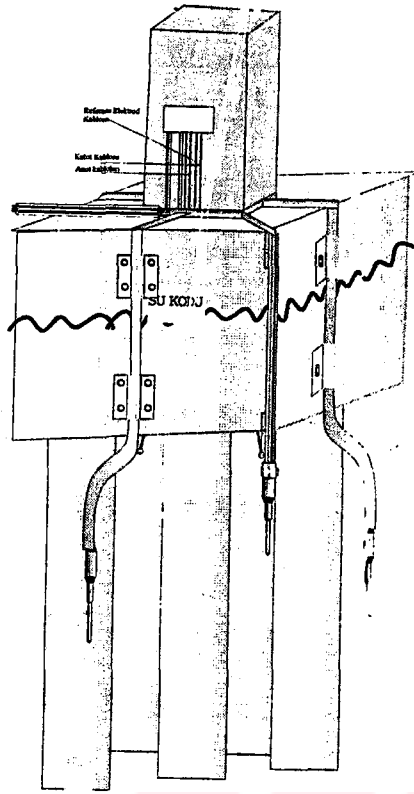
Referans elektrot olarak deniz kıyısındaki P3 ve P6 ayaklarında Cu/CuSO₄ (Bakır-Bakırsülfat), deniz içerisinde ise Ag/AgCl (Gümüş/Gümüş klorür) referans elektrodu kullanılmıştır. Deniz içerisinde her ayağın çapraz olarak iki köşesine birer tane olmak üzere toplam 2x8=16 adet Ag/AgCl, karada ise birer adet derinkuyu yataklarının yakınına ve beşer adet de palplanş boyunca deniz kıyısına olmak üzere toplam 1+1+(5x2)=12 adet Cu/CuSO₄ referans elektrod montajı yapılmıştır Referans elektrodlar deniz içerisinde deniz içerisinde deniz seviyesinden 3m aşağıya, karada ise zemin yüzeyinden 2 m aşağıya yerleştirilmiştir. Derinkuyu anodlarının ve deniz içindeki anodların kesit yerleşim planı ise Şekil 7.20 'de ve Şekil 7.21 'de gösterilmektedir.



Şekil 7.19 Anot ve referans elektrodların homojen dağılımı



Şekil 7.20 Derinkuyu anodu kesit yerleşim planı



Şekil 7.21 Deniz anodu kesit yerleşim planı

7.8. T/R Ünitelerinin Yerleşim Planı

1972'deki projede her ayak grubunda 1'er adet olmak üzere toplam 4 adet T/R ünitesi tesis edilmişti. T/R ünitelerinin sayısı şu an yapılan bu çalışmaya göre daha az sayıda olmasına rağmen çok az sayıda anod kullanıldığından ve anotlar T/R ünitelerinin yakınına monte edildiğinden anodlara enerji vermek problem olmuyordu. Ancak o zaman anod sayısı yetersiz olduğundan ve homojen bir şekilde dağıtılmadığından sistemden istenilen seviyede akım çekilemiyordu. Hatta bu tezdeki ön tasarım projesinde de 1972 sistem göz önüne alınarak her bir ayak grubu için birer adet T/R ünitesi tasarlanmasına rağmen nihai projelendirmede T/R ünitelerinin az olmasının sakıncaları göz önünde bulundurularak T/R ünitesi sayısı artırılmıştır. Nihai projede P3 ve P6 ayağına birer adet, her ayak üzerine de birer adet olmak üzere toplam 10 adet T/R ünitesi kullanılmıştır. T/R üniteleri 220 V AC gerilim ile ayrı ayrı ve bağımsız olarak enerjilendirilmiş olup 220 V enerji, P3 ayağının hemen yanında bulunan 1/0,4 kV trafo merkezinden kesintisiz olarak sağlanmıştır. R, S, T, fazları T/R ünitelerine dağıtılarak tek bir fazın aşırı yüklenmesi önlenmiştir. T/R ünitesi de dağılım planı Şekil 7.19 'de görülmektedir.

Eski projede olduğu gibi her bir ayak grubuna bir adet (toplam 4 adet) yerine, her ayak üzerine birer adet (toplam 10 adet) T/R ünitesi kullanılmasının sebepleri ve avantajları aşağıda sıralanmıştır.

1. Her bir ayak için ayrı T/R ünitesi kullanıldığında (Şekil 7.17) T/R ünitelerinden bir tanesinin herhangi bir sebeple devre dışı kalması halinde ayak grubundaki diğer üç T/R ünitesi çalışıyor durumda olacaktır. Böylece ayak grubundaki kazıkların 3/4'ü korozyona karşı korunmaya devam edilecektir. Hatta ayaklar birbirine yakın olduğundan devrede olan T/R üniteleri ve anodlar devre dışı kalan ayaklardaki kazıkları da katodik olarak korumaya devam edecektir.
2. Birinci madde de izah edilen durumun T/R ünitelerinin bir veya birkaç tanesi için aynı anda meydana gelmesi halinde devrede olan T/R ünitelerinden normalin üzerinde biraz daha fazla akım çekecektir. Ancak T/R ünitelerinde kapasite ile toleransı bırakıldığından bu durumdan çok fazla etkilenmeyeceklerdir.
3. Devre dışı kalan T/R ünitesi bir an önce deneye alınmalıdır. Çünkü devrede olan ayaklara ait anodlar devre dışı kalan ayaklardaki koruma potansiyelini yeteri kadar sağlayamayacaktır.
4. Şayet her ayak grubuna bir adet T/R ünitesi tesis edilseydi ayak grubundaki ortalama 18 adet anodun DC gerilim üzerinden ve tek merkezden enerjilendirilmesi gerekecekti. Bu durumda ayağın en uç noktasındaki anod ile T/R ünitesinin yakınındaki anoda çekilen kabloların uzunluğu farklı olacağından kablo iç dirençleri de farklı olacaktı. T/R ünitesinin potansiyeli uzaktaki anodlara farklı potansiyelerde ulaşacaktı. Her ayak üzerine birer T/R ünitesi tesis etmekle anodlara çekilen kabloların uzunlukları ortalama olarak birbirine eşitlenmiştir.
5. Dördüncü maddede bahsedilen durum referans elektrodları içinde söz konusudur. Farklı uzunluklarındaki kablolarla bağlı referans elektrodların elde edilen referans potansiyelleri deniz suyunun aktif potansiyelini ölçmede uyumsuzluklara sebep olacak, T/R ünitesinin otomatik geri besleme sisteminin çalışmasını etkileyebilecekti.
6. 10 adet T/R ünitesi kullanıldığı için her ayağın ayrı ayrı çektiği akım ve potansiyel değerleri okunabilmekte ve ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Böylece her T/R ünitesi

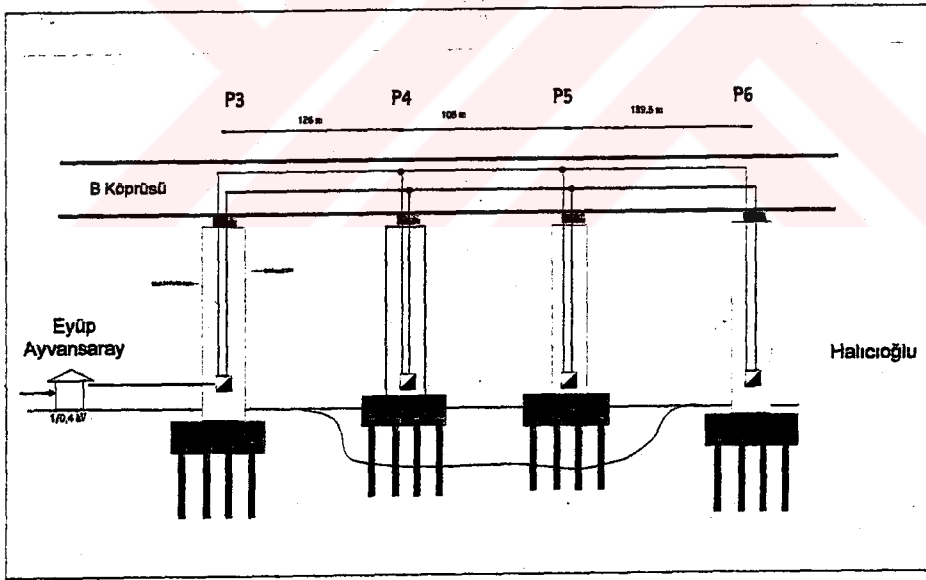
ve ayakta meydana gelen kimyasal reaksiyonların elektriksel sonuçları takip edilebilmektedir.

7. 4 yerine 10 adet T/R istasyonu kullanıldığı için ilk tesis maliyeti bir miktar artmaktadır.

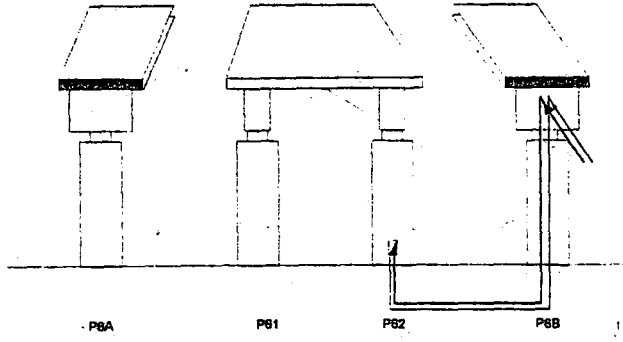
7.9. T/R Ünitelerinin Enerji Besleme Kabloları

7.9.1. Kablo dağıtım planı

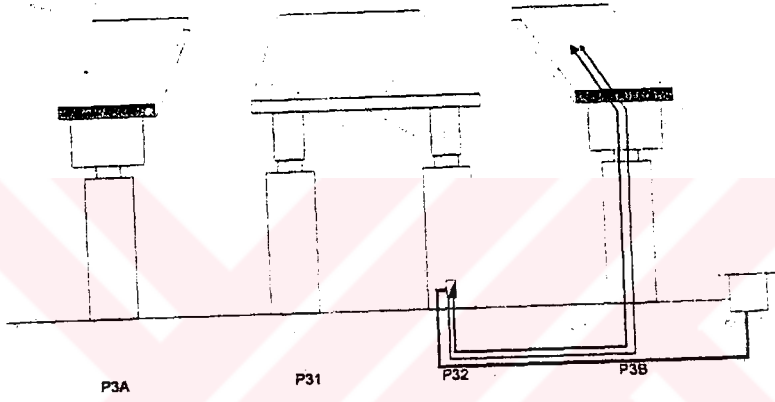
T/R ünitelerinin 220 V AC enerji beslemesi P3 ayağının hemen yanına tesis edilen 1/0,4 kV, 40 kVA trafo köşkü ile sağlanmaktadır. 4x10 mm² NYY enerji kablosu, P3B ayağı ve B çelik köprüsü kullanılarak P6 ayağına kadar ulaştırılır. Her ayak grubunun üzerine gelecek şekilde çelik köprü içerisinde ek kutusunda kabloya yapılan ekten alınan 4x10 mm² NYY kablo ayak betonları üzerinden T/R ünitelerine gelir. (Şekil 7.22, 7.23, 7.24 ve 7.25) Deniz içerisinde aynı eksen üzerinde bulunan ayaklara enerji kablosu kablo köprüleri üzerinden dağıtılır.



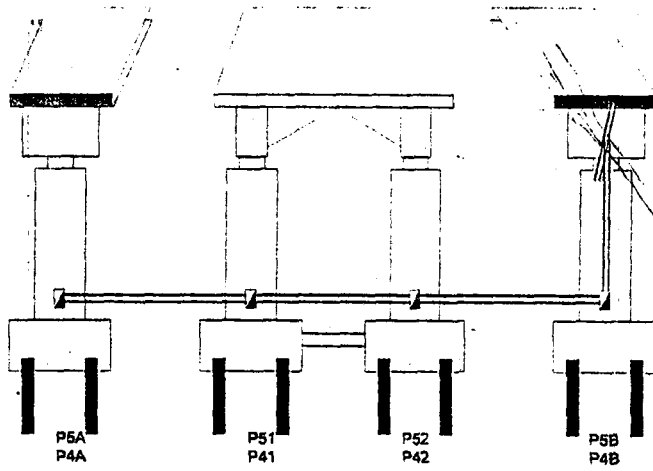
Şekil 7.22 Köprü boyunca kablo dağıtım planı



Şekil 7.23 P6 ayak grubundaki kablo dağıtım planı

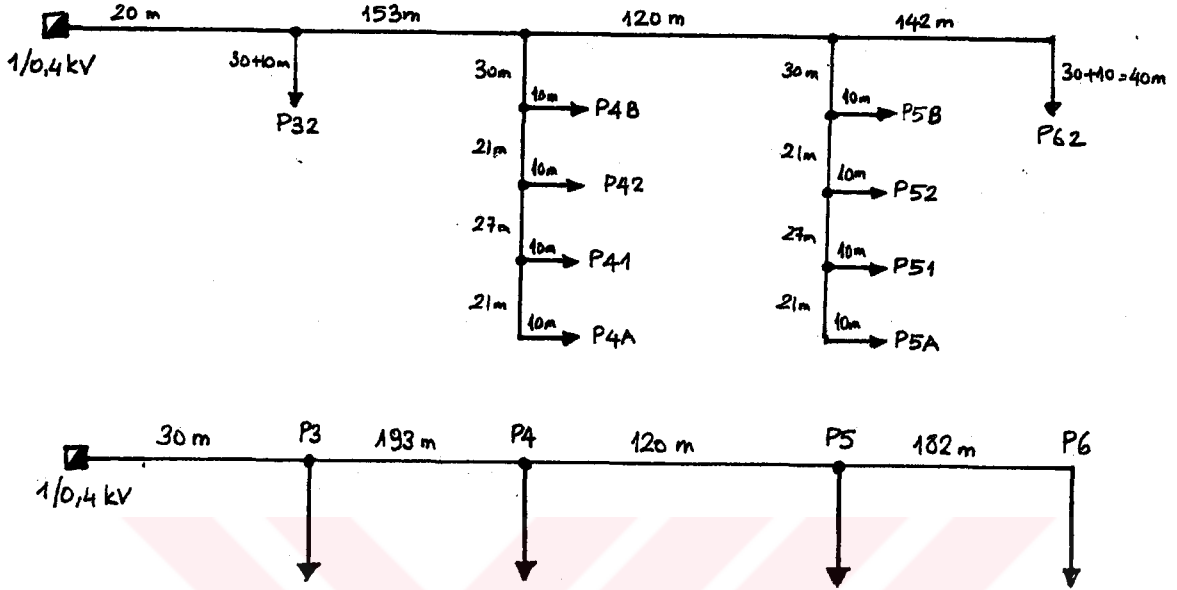


Şekil 7.24 P3 ayak grubundaki kablo dağıtım planı



Şekil 7.25 P4 ve P5 ayak grubundaki kablo dağıtım planı

7.9.2. Gerilim düşümü ve ısınma kontrolü hesabı



Şekil 7.26 Kablo dağıtım tek hat şeması

• Gerilim düşümü hesabı

Bölüm 7.6'da hesaplanan T/R ünitelerinin akım ve gerilimleri $P=V.I$ formülünde yerine konularak her T/R ünitesinin gücü hesaplanabilir. Bulunan T/R ünitesi güçleri aşağıdadır.

T/R 32 = $11,47 \cdot 44,14$ = 506 W	T/R 5B = $45,4 \cdot 30,7$ = 1393 W
T/R 4B = $41,87 \cdot 28$ = 1172 W	T/R 52 = $42,8 \cdot 35,5$ = 1519 W
T/R 42 = $39,2 \cdot 32,5$ = 1274 W	T/R 51 = $42,8 \cdot 32,5$ = 1519 W
T/R 41 = $39,2 \cdot 32,5$ = 1274 W	T/R 5A = $45,4 \cdot 30,7$ = 1393 W
T/R 4A = $41,87 \cdot 28$ = 1172 W	T/R 62 = $13,28 \cdot 58$ = 770 W

TOPLAM = 11997 W

En uzun linie= P62 Kablo Cinsi= $4 \times 10 \text{ mm}^2$ NYY

Gerilim düşümü hesabı güçlerin tek faza indirildiği ve nötr kablосundan akım geçmediği düşünülerek yapılacaktır.

$$\%e = \frac{100.PI}{K.q.V^2} \quad (7.6)$$

30m'lik kablodan çekilen güç: $11992 / 3 = 4 \text{ kW}$

193m'lik kablodan çekilen güç: $4 - 0,506 = 3,5 \text{ kW}$

120m'lik kablodan çekilen güç: $(1393+1519+1519+1393+770) / 3 = 2,2 \text{ kW}$

182m'lik kablodan çekilen güç: $0,77 \text{ kW}$

Yukarıdaki değerler (7.8) eşitliğinde yerine konulursa ,

$$\%e = \frac{100}{K.q.V^2} (30.4 + 193.3,5 + 120.2,2 + 182.0,77).10^3$$

$\%e = 4,42$ bulunur.

$$\%e = \frac{100.10^3}{56.10.220^2} (120 + 675 + 264 + 140) = \frac{119900}{27104} = 4,42$$

T/R üniteleri $\pm\%10$ voltaj değişimine karşı toleranslı olarak verimli bir şekilde çalışabilmektedir. $\%4,42 < \%10$ olduğundan seçilen $4 \times 10 \text{ mm}^2$ NYY kablo kesiti uygundur.

• Isınma kontrolü hesabı

En fazla yüklenen kablo 1/0,4 kV köşk ile P32 arasındaki kablodur.

$$P = V.I.Cosp \quad I = \frac{P/3}{V.Cosp} \quad (7.7)$$

Doğrulma işlemi yarı iletken elemanlarla yapıldığı için $\text{Cos}\phi = 0,5$ alınarak ve diğer değerler (8.9) eşitliğinde yerine konularak,

$$I = \frac{11992/3}{220.0,5} = \frac{400}{110} = 36,3 \text{ Amper bulunur.}$$

$4 \times 10 \text{ mm}^2$ NYY kablodan havada maksimum 60 Amper çekilebilir (EMO,1995).

$36,3 \text{ Amper} < 60 \text{ Amper}$ olduğundan seçilen kablo kesiti uygundur.

7.10. Haliç Köprüsü Katodik Koruma Sisteminin Maliyet Analizi

Katodik koruma sisteminin maliyet fonksiyonu sabit ve değişken maliyet bileşenleri halinde ifade edilebilir:

$$M = \bar{\bar{M}} + \tilde{M} \quad (7.5)$$

Sabit bileşen $\bar{\bar{M}}$ projenin keşif bedeline bağlı olarak iş bitimindeki toplam maliyet fiyatıdır. Bu bileşen içinde etüt, plan, proje, malzeme, montaj, nakliye maliyetleri bulunmaktadır. Diğer taraftan yıllık (periyodik) bakım-kontrol için ayrılacak pay ile yıllık amortisman payı sabit değerler olarak alınabilir. Katodik koruma sisteminin anot yatağı, ara bağlantı kabloları ve elektriksel bağlantı elemanlarının ekonomik ömrü oldukça uzun kabul edilebilir. Bilgisayar destekli kontrol sisteminin ise, gerek zaman içinde teknolojik eskimeye maruz kalması gerekse ortam koşullarından etkilenecek kullanım süresinin diğer donanıma göre daha kısa olabileceği düşünülebilir. Ancak bilgisayar destekli kontrol sisteminin katodik koruma maliyeti içindeki payı dikkate alındığında, “ekonomik ömür” kavramına bağlı amortisman değerinin çok küçük olacağı sonucuna varılabilir.

Değişken bileşen ($\tilde{M}$), katodik koruma sisteminin akım ihtiyacına göre değişen besleme gücüne ilişkin enerjinin tutarındır. 1/0.4 kV’luk ana besleme trafosundan fazlara dağıtılarak beslenen 10 T/R ünitesi bulunmaktadır. T/R ünitelerinin girişleri alternatif akım çıkışları ise doğru akım olduğundan, her iki yandaki I^2R kayıpları ile T/R ünitelerinin çıkış güçleri (VI) elektrik enerjisi tüketimini verir. Tüm katodik koruma sistemi için;

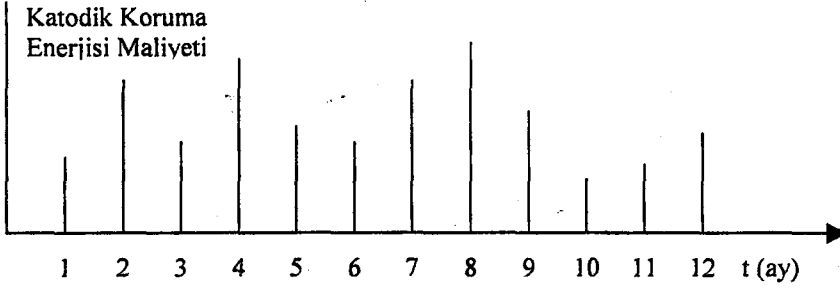
- Endüktif reaktanslar ihmal edilebilir
 - Alternatif akım tarafındaki bağlantı kablolarındaki deri etkisi de ihmal edilebilir.
- 0.4 kV tarafından çekilen toplam aktif güç

$$P = \sqrt{3} UI \cos \phi \quad (7.6)$$

Katodik koruma sisteminin “talep gücü”dür. $U = 0.4$ kV sabit tutulduğu halde, toplam (alternatif) akım I ve güç katsayısı anlık değişmektedir.

Çekilen gücün zaman ve geçerli enerji tarifiesiyle çarpımı enerji maliyetini verir; hem enerji miktarı hem de enerji tarifiesi sabit olmadığından, enerji maliyeti “değişken maliyet” olarak tanımlanır. Elektrik enerjisi ulusal enerji ağından sağlandığı için, bu enerjiye karşılık düşen maliyetin göz önüne alınması gerekir. Enerji tarifiesi aylık artışlar gösterdiği

için, 0.4 kV'luk barada Ocak, Şubat,, Aralık ayları için kaydedilecek (veya hesap edilecek) aylık enerji miktarları yardımıyla yıllık değişken maliyet bulunabilir. Katodik Koruma Enerjisinin Maliyeti (KKEM) $f = 1, 2, \dots, 12$ şeklinde bir dizi halinde hesap edilerek para akış diyagramı çizilir.



Şekil 7.27. Katodik koruma enerjisi maliyetinin para akış diyagramı halinde gösterilişi

(1. aydaki enerji tarifi minimum, 12. aydaki maksimum değerdedir. Ancak katodik korumanın akım ihtiyacı 1. aydan 12. aya doğru düzgün değişmemektedir.)

$A_1, A_2, \dots$ her aya ait KKEM olmak üzere birinci yılın sonundaki değişken maliyet

$$\tilde{M} = A_1 + A_2 + \dots + A_{12} \quad (7.7)$$

yazılabilir.

Elektrik enerjisinin abonelere dağıtılması yerine katodik koruma sisteminde kullanılması sonucu, paranın zaman değeri de yansıtılmalıdır. Her ayın sonu ile yıl sonu arasındaki süreçler $n_1, n_2, \dots$ olmak üzere, A maliyetleri $(1+i)^n$ ile çarpılacaktır; i geçerli ortalama aylık faiz oranıdır.

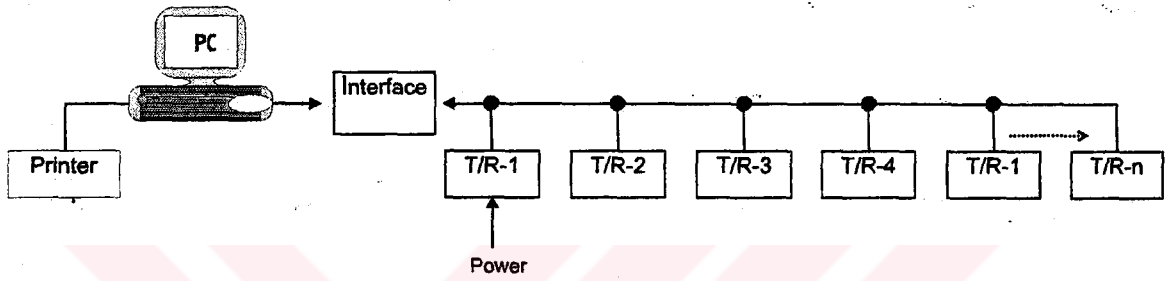
$$\tilde{M} = \sum_{f=1}^{12} A_f (1+i)^{n_f} \quad (7.8)$$

8. UZAKTAN İZLEME VE KONTROL SİSTEMİ

Katodik koruma sisteminin uzaktan izleme ve kontrol ünitesi temel olarak üç birimden meydana gelmektedir (Rizzo ve Wildman, 1997; Croal,1997).

- Kendi başına çalışabilen T/R üniteleri
- Optoelektronik line interface ünitesi
- Bilgisayar ünitesi

Uzaktan izleme ve kontrol sisteminin blok diagramı Şekil 8.1’de görülmektedir.



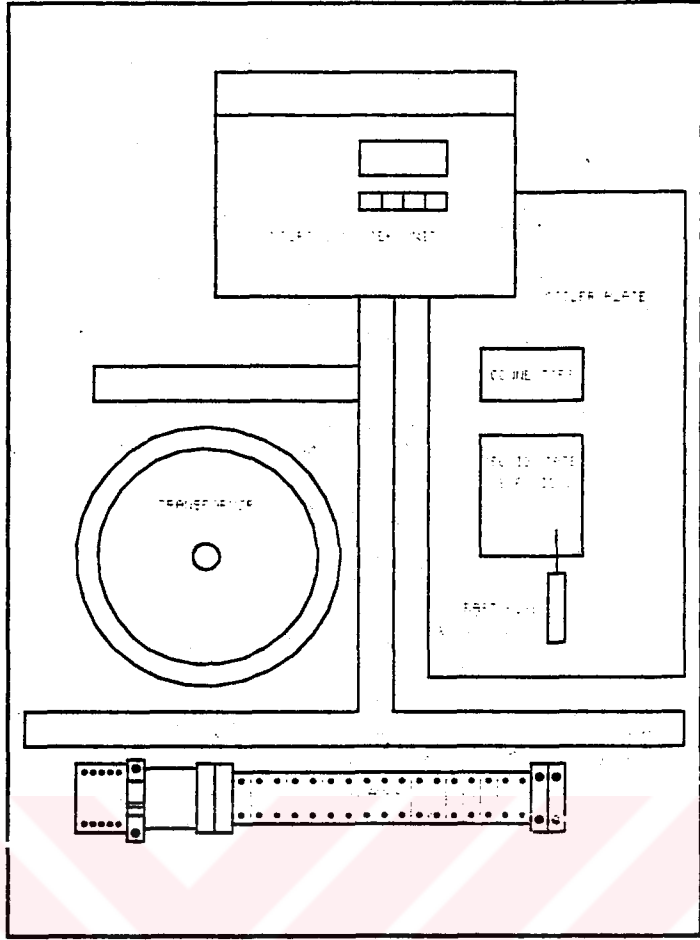
Şekil 8.1 Sistem blok diyagramı

Bilgisayar ile optoelektronik interface ünitesi RS232 iletişim hattı üzerinden birbirine bağlıdır. 100 adete kadar T/R ünitesi tek bir ağ içinde scada sistemi tarafından kontrol edilebilir. Her bir T/R ünitesi optoelektronik ayrıştırıcılara sahip olacak şekilde imal edilmiştir (Croal, 1997).

8.1. T/R Üniteleri

T/R üniteleri Haliç Köprüsü katodik koruma sistemi için hava soğutmalı ve scada uyumlu olarak imal edilmiştir (Dolan,1993). T/R ünitesi 5 ayrı temel birimden oluşmaktadır ve T/R ünitesinin içi dizaynı Şekil 8.2’de görülmektedir.

- Hava soğutmalı transformatör
- Mikrocontroller
- Tristörlü doğrultucu
- Koruyucu sigortalar
- Bağlantı elemanları



Şekil 8.2 T/R ünitesi iç dizaynının genel görünüşü

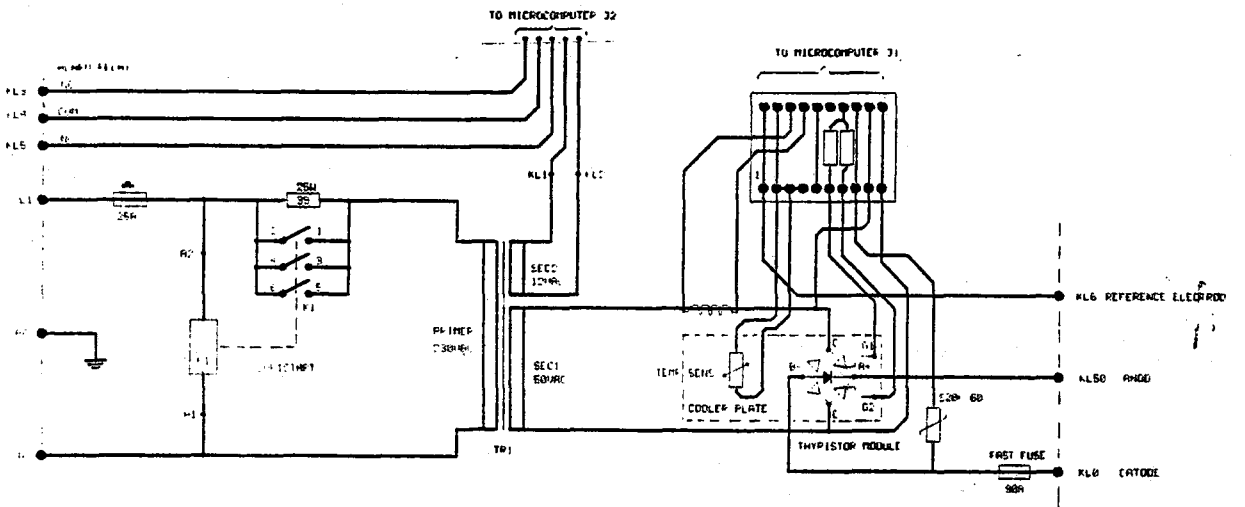
T/R ünitesi mikro kompüterlerle kontrol edilen bir cihazdır, tamamen otonom çalışır. Set edilen potansiyel değerlerini otomatik olarak yerine getirir. Üzerinde hareketli bir parça bulunmadığından bakım ve onarım gerektirmez. Herhangi bir PC ile scada sistemi tarafından çalışma ve set değeri okunabilir, değiştirilebilir. Ayarlanmış set değeri elektrik kesilmeleri halinde iki yüzyıl süreyle silinmeden saklanır. Sistemde meydana gelebilecek arızaları anında farkederek alarm rölesi ile ikaz eder. Kendi başına çalışabilen T/R ünitesi, optoelektronik line interface ve PC cihazları ile de koordineli çalışabilir. PC RS232 kominikasyon hattı ile optoelektronik line interface ünitesine bağlanır. T/R ünitesi birden fazla (100) adete kadar tek bir ağ içinde scada sistemi tarafından kontrol edilebilir. Her bir T/R ünitesi optoelektronik ayrıştırıcılara sahiptir. Bu nedenle birden fazla T/R üniteleri arasında tam bir galvanik ayrışım sağlanabilir. Cihazın imalat ile ilgili teknik özellikleri aşağıdaki gibidir.

Besleme Gerilimi : 230 V ($\pm\%10$, 1 faz)

Giriş Akımı	: 18 Amper
Giriş Frekansı	: 50-60 Hz
DC Çıkış Voltajı	: 0-50 V
DC Çıkış Akımı	: 0-80 A
Kontrol Sistemi	: Otomatik sabit potansiyel ve uzaktan PC kontrollü
Çalışma Sıcaklığı	: Min -30 °C, max +70 °C
Transformatör Soğutma Tipi	: Hava ile
Kontrol Birimi	: Mikro bilgisayar kontrollü, Arizona mikrocip TM
Tristör Modülü	: 1xYS TM VHF 85-12107
Doğrultucu Sistemi	: Faz açısı ile kontrol

8.1.1. DC çıkış güç kontrolü

T/R ünitelerinde güç kontrolü faz açısı ayarlama yöntemiyle yapılır. Çıkış katı normalde tam dalga doğrultma yapan bir redresör devresinden farksızdır. Ancak buradaki köprü diyot devresi kontrol edilebilir bir köprü diyot devresidir. AC sinyali sıfır geçişlerindeki faz açısı sıfır derece kabul eder. Her alternans sıfır derece ile başlayıp 180 derecede sona ermektedir. Kontrol edilebilir köprü diyot devresi sıfır derecede tetiklendiğinde maksimum çıkış gücü elde edilir. Örnek olarak: 90 derecede tetiklenen köprü diyot devresi $\frac{1}{2}$ çıkış gücü vermektedir. Böylece bu yöntemle herhangi hareketli bir parça olmadan çıkış gücü ayarlaması yapılmaktadır. T/R ünitesinin elektronik devre detayı Şekil 8.3'de görülmektedir (Mac Millan, 1993; Husock, 1983).



Şekil 8.3 T/R ünitesinin elektronik devre detayı

8.1.2. T/R ünitesi çalışma prensibi

Enerji verilen T/R ünitesi, ilk olarak çalışması için gerekli olan initalizasyon ve testleri yapar, bu esnada mikro-kompüter daha önceden verilmiş nominal potansiyel değerini hafızasından okur. Aktüel potansiyel değerini okur, nominal potansiyel değeri ile karşılaştırıp, hata oranına göre güç çıkış katına hangi oranda enerji vermesi gerektiğini bildirir. Böylece anot katot devresine akım tatbik edilir. Çok yüksek hata oranlarında ise (yüksek nominal-aktüel potansiyel farkı) mikro-kompüter çıkış katına tam güç çalışma sinyali verir. Ancak çıkış katından tatbik edilen akım sınır değerlerine erişirse, akım bu değerde sınırlı kalır. Referans voltajı her 60 saniyede bir ölçülür. Bu esnada anot katot devresine uygulanan akım çok kısa bir süre için kesilir ve referans voltajı ölçülür. Mikro-kompüter ünitesinin nominal –aktüel potansiyel farkına göre yaptığı hesaplamalarda P-I algoritması kullanılır. Amaçlanan nominal potansiyel değerine yaklaşıldıkça oransal hata azalır. Ancak bu durumda meydana gelen statik hata integral hesaplaması yapılarak sıfıra indirgenir.

8.1.3. T/R ünitesinin test edilmesi ve devreye alınması

İlk olarak kablo bağlantılarının doğruluğu gözden geçirilir. Elektriksel bağlantının doğruluğu tespit edildikten sonra referans voltajı bağlı olduğu klemens'ten 0-0,7 V arası bir gerilimin olduğu gözlenmelidir. Bu işlem herhangi bir multimetre ile yapılabilir. Anot katot klemensleri arasında 1 ohm'dan daha küçük bir direnç izlenmelidir. T/R ünitesine enerji verildiğinde ilk olarak bir kimlik numarası verilmelidir, bu numaralar 1'den başlayarak sırasıyla T/R ünitesi sayısı kadar olmalıdır. Örnek olarak, 10 T/R ünitesi var ise cihazlar 1'den 10'a kadar numaralandırılmalıdır. Bu işlem scada uygulamaları için gereklidir. Kimlik numarası sıfır olan cihazlar scada sistemi tarafından kontrol edilemez ve bağımsız olarak çalışırlar. T/R üniteleri imal edilirken ayar olarak nominal potansiyel değeri sıfır verilmiştir. Aynı zamanda sıfır değeri cihazın kapalı olması manasına gelmektedir. Meydana gelebilecek elektrik kesilmelerinde herhangi bir değer yazılması ve reset gerekli değildir.

8.1.4. T/R ünitelerinin programlanması

Cihaz üzerinde 2x16 karakter dotmatrix display ve 4 adet tuş bulunmaktadır. Cihaz panosu içerisindeki W-otomat on pozisyonuna getirildiğinde, mikro bilgisayar ünitesi display de firma logosunu yazar. Bu esnada sistem için gerekli olan initalizasyon ve testler yapılır. Birkaç saniye sonra display de çalışma voltajı, amperajı ve aktüel potansiyel değerleri gösterilir. Bu display modu ana sayfadır. Set edilmiş nominal potansiyel değeri ve cihaz kimlik numarası SElect tuşuna basılarak izlenilebilir.

- **Set değerinin değiştirilmesi**

SElect tuşu ile nominal potansiyel değeri seçilir. Bu sayfa içinde SET tuşuna basılırsa nominal potansiyel değeri eksi ve artı tuşları vasıtasıyla değiştirilebilir.

SElect tuşuna basılarak işlem tamamlanır.

- **Cihaz kimlik numarasının değiştirilmesi**

Cihaz kimlik numarası scada uygulamalarında gereklidir. Scada ağına bağlı her cihaz bir diğerinden farklı kimlik numarasına sahip olmalıdır. Örnek olarak 10 adet T/R ünitesi var ise birden ona kadar numaralandırma yapılmalıdır. Sistem dışı bağımsız çalıştırılmak istenilen cihazlarda kimlik numarası sıfır seçilmelidir.

SElect tuşu ile cihaz kimlik numarası değeri eksi ve artı tuşları vasıtasıyla değiştirilebilir. SElect tuşuna basılarak işlem tamamlanır.

Değer değişikliği yapılmasına rağmen SElect tuşuna basılarak işlem tamamlanmaz ve 10 saniye içinde hiçbir tuşa basılmazsa ana display moduna dönlür. Yapılan değişiklik dikkate alınmaz ve eski değer geçerli kalır.

8.1.5. T/R ünitesinin arıza mesajları

T/R ünitesi katodik sistemindeki arızalar esnasında arıza mesajları verebilir ve kendiliğinden devre dışı kalabilir. T/R ünitesi üç adet hata mesajı verebilir.

- Referans elektrod kopukluğunda
- Anod katod bağlantısı kopukluğunda
- Aşırı sıcaklık durumunda (80 °C üzeri)

Referans elektrod kopukluğu durumu ve aşırı sıcaklık durumunda T/R ünitesi anod katod devresinin akımını tamamen keser. Hata durumu ortadan kaldırıldığında cihaz normal çalışmasına devam eder, herhangi bir reset gerekmez.

Referans elektrot voltajı 0-3 volt arasında iken herhangi bir hata mesajı verilmez. Referans elektrot girişi çok yüksek bir direnç (6,2 megaohm) tarafından +5 Volt hattına çekilmektedir. Kablo kopukluğunda girişte 3 voltun üzerine bir gerilim okunur. Mikro-kompüter bunu hata olarak değerlendirir. Display’de, “Reference Error, Checek cable and connection” yazısı belirir (Referans elektrot hatası, kablo ve bağlantıları kontrol ediniz) Bu hata esnasında çıkış katı tamamen uygulandığı enerjiyi durdurur. Hata düzeltildiğinde cihaz kaldığı yerden normal işlemine devam eder. Herhangi bir reset gerektirmez.

Anot-katod hatası, anot ve katod arasındaki dirence göre belirlenir. Güç katı anot-katod devresine enerji tatbik ettiğinde geçen akım ve uygulanan gerilime göre anot-katod devresine enerji tatbik ettiğinde geçen akım ve uygulanan gerilime göre ise mikro-kompüter bunu hata olarak değerlendirir. Display’de “AN&CAT error, check cable and connection” yazısı belirir (Anot-katod hatası, kablo ve bağlantıları kontrol ediniz) Bu hata esnasında sadece display de hata mesajı verilir, herhangi bir reset gerektirmez.

Yüksek sıcaklık hatası: Cihaz içerisinde soğutucu üzerinde bulunan sıcaklık sensörü tarafından sıcaklık ölçümü yapılır. Bu sıcaklık değeri 80 °C üzerinde ise sıcaklık hatası olarak değerlendirilir. Displayde “Over temperature error, cool the unit” yazısı belirir (Aşırı sıcaklık hatası, cihazı soğutunuz) Bu hata esnasında çıkış katı tamamen uyguladığı enerjiyi durdurur. Cihaz soğuduğunda kaldığı yerden normal işlemine devam eder. Herhangi bir reset gerektirmez.

Bütün hatalar esnasında mikro-kompüter ünitesi içerisinde bulunan rölenin akımını keser ve röle kontakları vasıtasıyla herhangi bir alarm sinyali elde edilebilir. Normal çalışma esnasında röle devamlı aktif durumdadır. Cihazın enerjisi kesildiğinde de bu durum hata olarak değerlendirilebilir zira röle aktif durumda değildir.

8.1.6. Ripple incelenmesi

Ripple, bir T/R ünitesinde DC çıkış voltajındaki dalgalanma olarak tanımlanmaktadır. Akımın, ripple veya daha da abartılı olarak kesikli hali bile katodik koruma sistemlerine etkili olmaz, çünkü korunan yapı belirli bir potansiyele kadar katodik yönde polarize olur. 50 Hz'lik bir alternatif akımdan elde edilen doğru akım yarım dalga olursa 1/50 sn kesilip 1/50 sn'de değiştiğinde potansiyelde ripple oranı kadar bir değişme olacaktır. Bu değişiklik ise katot polarizasyonunu asla etkilemez. O halde akımın ripple veya kesik dalgalı olması hiçbir dezavantaj oluşturmaz, aksine katot yüzeyinde oluşan hidrojen polarizasyonunu gidermesi yönünde etkili olursa faydalı bir durum oluşturur.

Anotlar için ripple'in önemini ise şöyle açıklayabiliriz. Kütle anotlarda ripple in önemi yoktur. Katot olaylarında olduğu gibi olsa faydası olur. Ancak tek bir cins anot ile yapılan uygulamalarda ripple'in olumsuz etkisi tespit edilmiştir. Özellikle Pt kaplamalı anotlar içinde Pt soy bir metal olduğundan kaplama sırasında ana anot metali ile yüzeyde bir alaşım oluşturmaz ve yüzeyi tamamen bir kabuk örtü gibi kaplar. Bu kaplamayı yüzeye bağlayan kimyasal veya fiziksel bir bağ yoktur. İşte bu anotlarda ripple %7'nin üzerinde olduğunda kaplamanın yüzeyden ayrılması hadisesi zaman zaman gözlenmiştir. Bu olumsuz etkiden dolayı platin kaplamalı (platinize titanyum) anotların kullanıldığı katodik koruma sistemlerinde T/R ünitesi çıkışında ripple'in '7'den fazla olması istenmez.

Bu projede kullanılan anotlar karma oksit kaplı titanyum anotlardır. Bu anotların yüzeylerinde alaşım halinde ve titanyum metali ile kimyasal olarak bağlanmış bir kaplama oluşturulmuştur. Yani kaplama yüzeyden metalin içine doğru değişen bileşimle oluşarak metalle birleşmiş durumdadır. Bu nedenle bu anotların kullanıldığı katodik koruma sistemlerinde T/R ünitelerin DC çıkış akımlarındaki ripple'an anotlar etkilenmez. Aslında araştırma neticesinde karma oksit kaplı Titanyum anotlar platinize titanyum anotlardaki olumsuz etki nedeniyle üretilmişlerdir.

8.2. Optoelektronik data-line interface

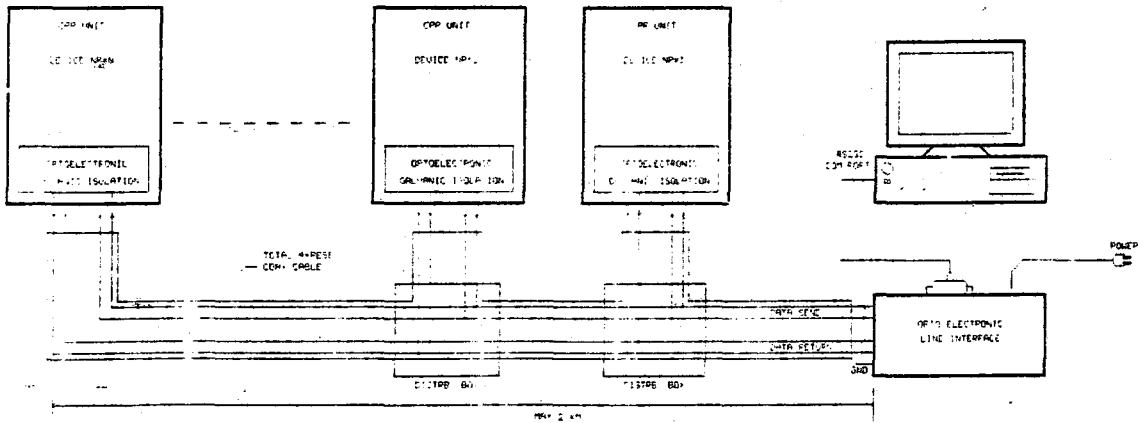
Optoelektronik data-line birimi PC ile data hattı arasında galvanik ayrışım sağlar, sinyalleri güçlendirir. PC'nin RS232 kominikasyon portu bir ucu 25 pin diğer ucu 9 pin konnektörlü

kablo ile interface'e bağlanır. Interface 230 AC şehir şebekesi tarafından beslenir. Data hattı 8 pin konnektör ile cihaza bağlanır.

8.3. Bilgisayar Sistemi ve Bilgi Alışverişi

Scada sistemi T/R üniteleri ile PC arasında bilgi alışverişini sağlar. Böylece PC tarafından çalışma ve set değerleri okunarak kayıt edilebilir, set değerleri değiştirilebilir. SCADA programı setup disketleri tarafından PC'ye yüklenir (Gardland vd., 1993).

PC'nin COM2 potru olan 25 pin D konnektör ve interface'in arkasında bulunan 9 pin D konnektör standart RS232 kablosu vasıtasıyla bağlanır. Yine interface'in arkasında bulunan 8 pin konnektör vasıtasıyla cihaz data hattına bağlanır. Bu hat iki bilgi gönderme ve iki bilgi geri dönüş hattı olmak üzere dört iletkenli bir kablodan meydana gelmiştir. Bu kablolar T/R üniteleri içindeki klemenslere bağlanır. Cihaz devreye alındıktan sonra PC üzerine yüklü bulunan DSCADA programı çalıştırılır. Bilgi alışverişini temsil eden bağlantı şeması şekil 8.4'te görülmektedir.



Şekil 8.4 Bilgi alışverişi bağlantı şeması

Interface PC'den gelen dijital sinyalleri galvanik ayrışım yapıldıktan sonra güçlendirir ve data hattı üzerinden gönderilen sinyaller 0-12 volt seviyesindedir. Merkezde kullanılan

PC, RS-232 hattından interface ünitesi bilgi alışverişi yapılacak T/R ünitesi ile ilgili bilgileri gönderir. Bu sinyaller interface ünitesi tarafından güçlendirilerek Data hattına gönderilirler. Bütün bu bilgiler her T/R ünitesi tarafından algılanır. Sadece kimlik numarası, PC'nin bilgi alışverişi yapmak istediği kimlik numarasına eş olan T/R ünitesi bilgi geri dönüş hattına istenilen bilgileri gönderir. Data hattına PC tarafından gönderilen bilgiler iki türdür.

Birincisi; T/R ünitesinden bilgi isteme $\langle\langle H, I, C, \Sigma \rangle\rangle$

İkincisi; T/R ünitesinden nominal potansiyel değeri gönderme $\langle\langle H, I, NP, \Sigma \rangle\rangle$ şeklindedir.

T/R üniteleri ise bilgi dönüş hattına tek tip bilgi gönderirler.

$\langle\langle I, V, A, AP, NP, S, \Sigma \rangle\rangle$ şeklindedir. Burada;

“H” = Hazırol,

“I” = Cihaz kimlik numarası

“C” = Command (Bilgi okuma veya bilgi yazma komutu)

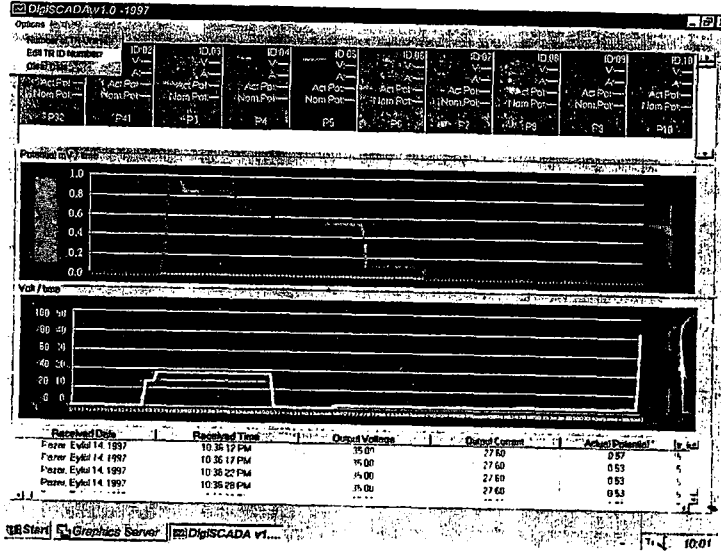
“Σ” = Gönderilen bilgilerin toplamı (Sağlama yapmak için)

“NP” = Nominal potansiyel değeri

“S” = Status (Normal çalışma veya arıza kodu) şeklindedir.

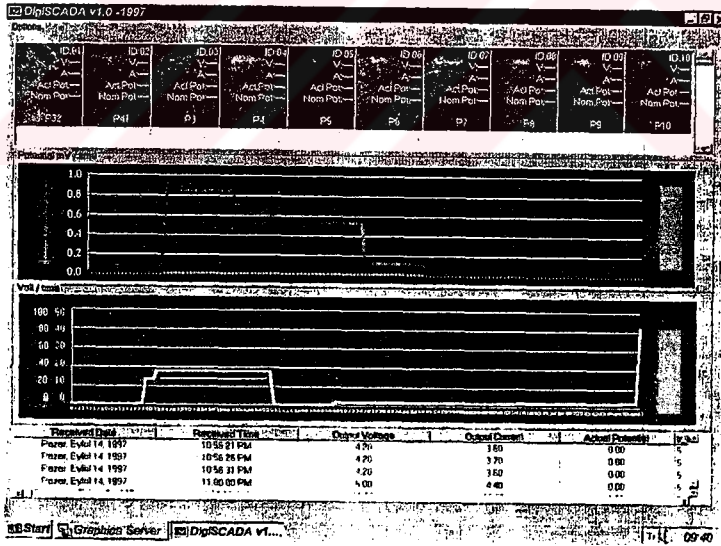
“Σ” bilgisi gönderilen bilgilerin üst üste toplanmasıyla elde edilir. Bilgi gönderilen taraf (T/R üniteleri veya PC) gelen bilgileri üst üste toplar ve elde edilen değeri son olarak gelen “Σ” değeri ile karşılaştırır. Eğer bu iki değer aynı değilse gelen tüm bilgiler geçersiz sayılıp dikkate alınmazlar.

SCADA ilk olarak çalıştırıldığında options / number of T/R units seçeneğinden scada sistemine bağlı cihaz sayısı verilir. (Şekil 8.5) Scada sistemine bağlı cihazlara değişik isimler verilebilir. Bunun için options / Edit T/R ID numbers seçeneğinden değişik isimler verilebilir.



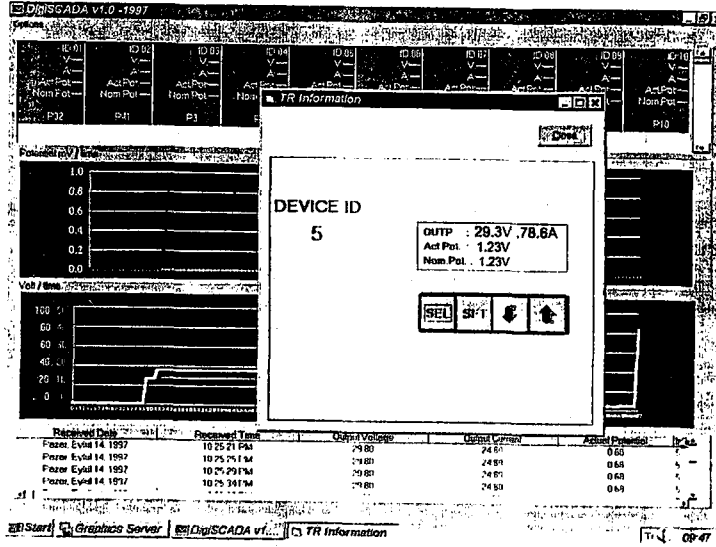
Şekil 8.5 Bilgisayarda T/R numarası verilmesi

SCADA programı yarım saate bir sisteme bağlı olan cihazlardan bilgi toplar ve kayıt eder. Ekranın üst tarafında küçük kutucuklar halinde T/R ünitelerinin değerleri gösterilmektedir. Bu kutulardan herhangi biri tıklandığında ekrana T/R ünitelerindeki mikro kompüter görüntüsü gelir. Bu esnada seçilen cihazın o anki değerleri ekranda gösterilir (Şekil 8.6).



Şekil 8.6 Bilgisayarda T/R seçilmesi

Close seçeneği ile bu pencere kapatılabilir. Ekranın orta kısmındaki grafikte son seçilen cihazın haftalık volt, amper ve aktüel potansiyel değerleri gösterilir (Şekil 8.7).



Şekil 8.7 Bilgisayarda potansiyellerin okunması

9. SİSTEMİN TESTLERİ VE AKIM İNCELEMELERİ

Bu bölümde montajı gerçekleştirilen katodik koruma sistemin işletmeye alma testleri gerçekleştirilecektir. İşletmeye alma testleri 3 ana grup altında toplanabilir (Daley ve Ingraham, 1987).

- Anotların kontrolü ve geçiş dirençlerinin tespiti
- Kablo testleri
- Referans elektrodların kontrolü

Haliç köprüsünün katodik koruma sisteminde derinkuyu anotları ve deniz anotları olmak üzere iki ayrı tip karmaoksit kaplı titanyum anot kullanılmaktadır. Bu sebeple derinkuyu ve deniz anotlarının geçiş dirençleri farklı yöntemlerle tespit edilecektir. Ayak gruplarına göre kullanılan anot tipleri:

P3 Ayak grubu	: Derinkuyu anotları
P4 Ayak grubu	: Deniz anotları
P5 Ayak grubu	: Deniz anotları
P6 Ayak grubu	: Derinkuyu anotlarıdır.

Kablo testi olarak tüm katod kabloları, anot kabloları ve referans elektrod kabloları ayrı ayrı test edilecektir. Katodik koruma sisteminde katod kablosu olarak 1x50 mm² NYY, anod ve referans elektrod kablosu olarak 1x16 mm² EPR/CSPE kablo kullanılmaktadır. Test sonucunda tüm kabloların sağlamlığı anlaşılabacaktır.

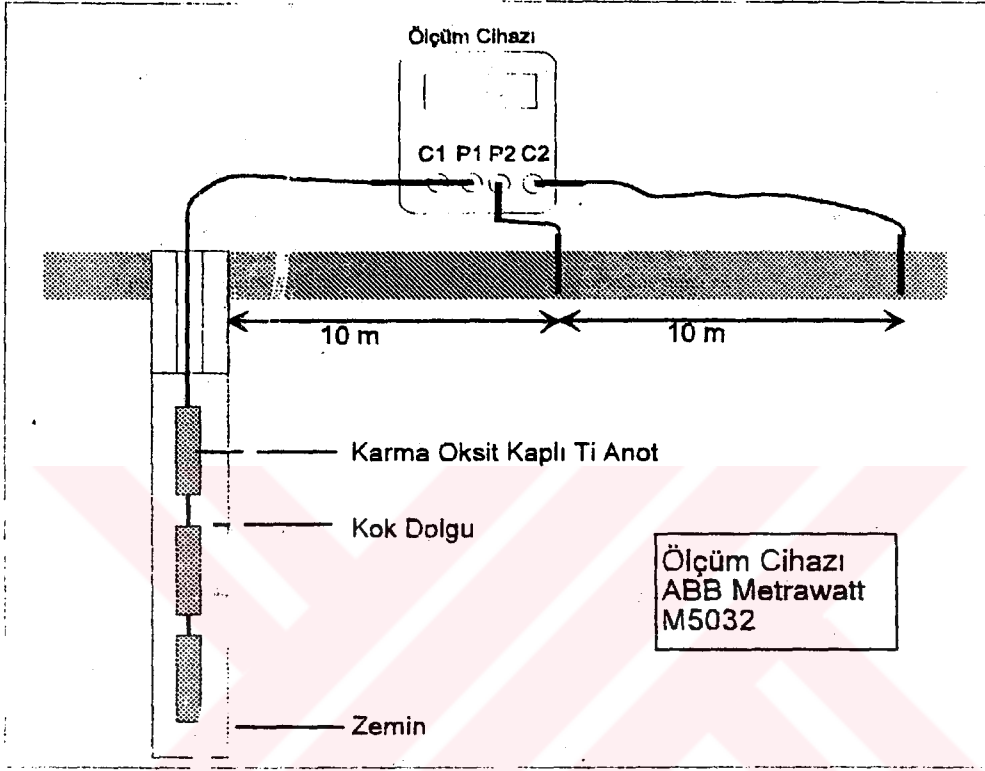
Haliç köprüsünün katodik koruma sisteminde deniz içinde Ag/AgCl (Gümüş-gümüş klorür) ve karada Cu/CuSO₄ (Bakır-bakır sülfat) olmak üzere iki ayrı tip referans elektrodu kullanılmaktadır. Ayak gruplarına göre kullanılan referans elektrod tipleri:

P3 Ayak grubu	: Cu/CuSO ₄
P4 Ayak grubu	: Ag/AgCl
P5 Ayak grubu	: Ag/AgCl
P6 Ayak grubu	: Cu/CuSO ₄ 'dür.

9.1. Derinkuyu Anod Yataklarının Geçiş Dirençlerinin Tespiti

Yukarıda açıklandığı üzere P3 ve P6 ayak gruplarında derinkuyu tip anodlar kullanılmaktadır. Bu sebeple her iki ayak grubundaki geçiş dirençlerinin tesbiti aynı

yöntemle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların normal sınırlar içerisinde kalması halinde bu sonuç aynı zamanda anotların montaj yapıldığı zeminde problemsiz çalışmakta olduğunu da gösterecektir. Derinkuyu anod yataklarının tespiti için anotların montajı tamamlandı derinkuyu işlemi bitirildikten sonra 18.10.1997 tarihinde Şekil 9.1'deki test düzeneği kuruldu.



Şekil 9.1 Derinkuyu anod yatağı geçiş direncinin ölçülmesine ait test düzeneği

Daha sonra aşağıdaki işlem sırası takip edilerek ölçmeler gerçekleştirildi.

- 4 uçlu zemin rezistivite cihazının C1 ve P1 uçları birleştirilerek anot yatağından gelen kabloya bağlanır.
- P2 ucu anot yatağından 10 m uzağa, C2 ucu da anot yatağından 20 m uzağa gelecek şekilde ölçme elektrotları zemine yerleştirilir. Elektrotlar en az 20 cm zemine girmelidir.
- Bu bağlantı tamamlandıktan sonra cihaz üzerinden direkt direnç okuması yapılır.

Yapılan ölçmeler sonucunda,

P3 ayak grubu anot yatağında : 0,32 ohm

P6 ayak grubu anot yatağında : 0,40 ohm bulundu.

Daha sonra P3 ve P6 ayak gruplarında toplam DC devre direncini hesaplayabilmek için 07.08.1998 tarihinde T/R üniteleri yardımıyla aşağıdaki ölçmeler yapıldı.

P3 ayak grubunda : 9,4 Volt, 48,3 Amper

P6 ayak grubunda : 7,6 Volt, 17,8 Amper

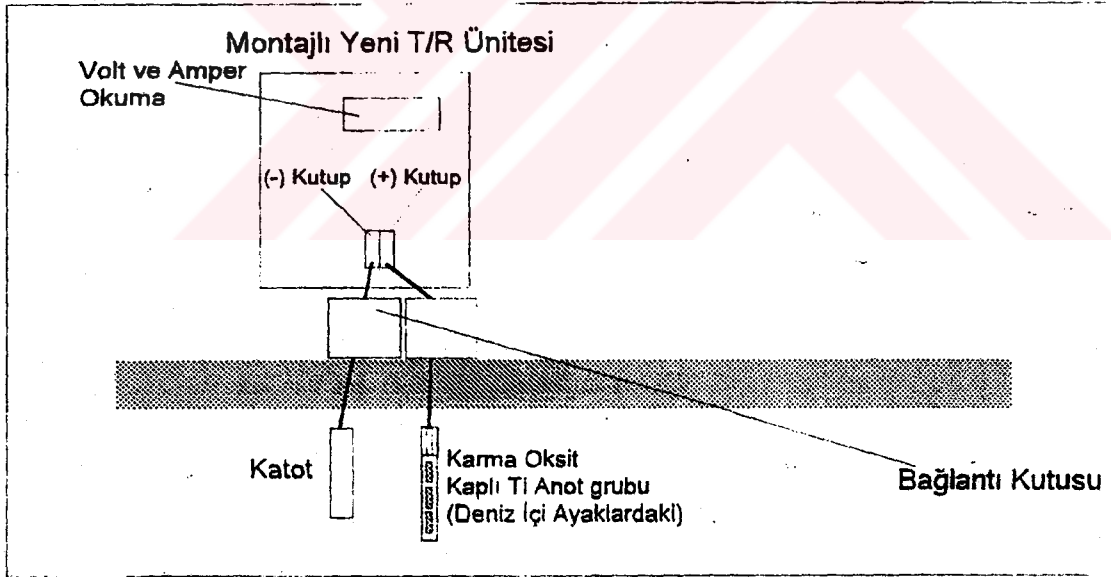
Bu sonuçlar kullanılarak,

$$R_{T3}=9,4 / 48,3 = 0,19 \text{ ohm} , \quad R_{t6}=7,6 / 17,8 = 0,42 \text{ ohm} \text{ bulunur.}$$

Bu sonuçlar daha sonra uzaktan kontrol bilgisayar ünitesinden elde edilen akım ve gerilim değerleri ile karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

9.2. Deniz Anodlarının Geçiş Dirençlerinin Tespiti

Deniz içindeki anodların geçiş dirençlerinin tespitindeki yorumlamalarda daha sonra kullanılmak üzere katodik koruma sisteminin deniz anodları montajı yapıldıktan sonra 18.10.1997 tarihinde Şekil 9.2'deki düzenek kullanılarak akım ve gerilim ölçmeleri yapılmıştır.



Şekil 9.2 Deniz içindeki anodların test düzeni

Ölçmelerde aşağıdaki işlem sırası takip edildi.

- İlgili T/R ünitesine gelen katot uçları bağlantı kutusunda birleştirilir.
- İlgili T/R ünitesine gelen anot uçları bağlantı kutusunda birleştirilir.

- Katot uçları T/R ünitesinin (-) ucuna, anot uçları ise T/R ünitesinin (+) ucuna bağlanır.
- T/R ünitesine enerji verilerek çıkış DC voltajı, kademeli olarak değiştirilmek suretiyle her gerilim değeri için devreden geçen akım ölçülür ve kaydedilir.

Yapılan ölçme sonucunda Çizelge 9.1 ve 9.2'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 9.1 Deniz anotlarının geçiş direncine ait ölçme sonuçları (P4 ayak grubu)

Ölçme No	T/R ÜNİTESİ ADI							
	P4A		P41		P42		P4B	
	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)
1.	1,00	0,93	1,00	1,08	1,00	1,24	1,00	1,00
2.	2,50	2,86	2,50	3,33	2,50	3,81	2,50	3,08
3.	5,00	6,43	5,00	7,50	5,00	8,57	5,00	6,92
4.	7,50	10,00	7,50	11,67	7,50	13,33	7,50	10,77
5.	10,00	14,29	10,00	16,67	10,00	19,05	10,00	15,38
6.	12,50	18,57	12,50	21,67	12,50	24,76	12,50	20,00
7.	15,00	22,86	15,00	26,67	15,00	30,48	15,00	24,62
8.	20,00	32,14	20,00	37,50	20,00	42,86	20,00	34,62
9.	25,00	40,71	25,00	47,50	25,00	54,29	25,00	43,85
10.	30,00	50,36	30,00	58,33	30,00	66,67	30,00	53,85

Çizelge 9.2 Deniz anodlarının geçiş direncine ait ölçme sonuçları (P5 ayak grubu)

Ölçme No	T/R ÜNİTESİ ADI							
	P5A		P51		P52		P5B	
	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)
1.	1,00	1,18	1,00	1,37	1,00	1,31	1,00	1,13
2.	2,50	3,64	2,50	4,21	2,50	4,04	2,50	3,48
3.	5,00	8,18	5,00	9,47	5,00	9,09	5,00	7,83
4.	7,50	12,73	7,50	14,74	7,50	14,14	7,50	12,17
5.	10,00	18,18	10,00	21,05	10,00	20,20	10,00	17,39
6.	12,50	23,64	12,50	27,37	12,50	26,26	12,50	22,61
7.	15,00	29,09	15,00	33,68	15,00	32,32	15,00	27,83
8.	20,00	40,91	20,00	47,37	20,00	45,45	20,00	39,13
9.	25,00	51,82	25,00	60,00	25,00	57,58	25,00	49,57
10.	30,00	63,64	30,00	73,68	30,00	70,71	30,00	60,87

Bilgisayarlı uzaktan kumanda ünitesi ve T/R ünitelerinin işletmeye alınmasını takip eden 07.08.1998 tarihinde deniz anotlarının geçiş dirençlerini ayrı ayrı tespit edebilmek amacıyla T/R üniteleri yardımıyla aşağıdaki testler gerçekleştirildi.

1. Bunun için önce ortam potansiyeli seyyar referans elektrod yardımıyla ölçülerek kaydedildi ve her ayağa ait T/R ünitesi ekranından bu potansiyele karşılık gelen akım ve gerilim değerleri okundu. Elde edilen bu akım ve gerilim değerleri kullanılarak direnç hesaplandı. Sonuçları Çizelge 9.3'de görülmektedir. Bu sonuçlar tüm anodların sisteme bağlı olması durumunda ölçülen sonuçlardır.

Çizelge 9.3 Anod geçiş direnci hesabı

	P4A	P41	P42	P4B	P5A	P51	P52	P5B
Gerilim (V)	9	3,8	3,4	4,5	6,5	1,1	4,4	4,5
Akım (A)	40	14	11,6	17,5	28,8	4,9	16,7	17,8
Direnç (ohm)	0,225	0,271	0,293	0,257	0,225	0,224	0,263	0,257
Ortam Potansiyeli (mV)	-900	-965	-880	-800	-970	-613	-730	-880

2. Daha sonra her ayaktaki sisteme bağlı tüm anodların kabloları ayrılarak anodlar birbirinden bağımsız hale getirildi. Her anoda T/R ünitesinden gerilim uygulanarak her anodun ayrı ayrı akım ve gerilimi ölçüldü. Sonuçlar ve bu sonuçlara göre hesaplanan tek anod geçiş dirençleri ve ortalama anod geçiş dirençleri Çizelge 9.4'de görülmektedir.

Çizelge 9.4 Tüm anodların ortalama geçiş dirençleri

	P4A			P4B			P42			P42		
Anod No	DC V	DC A	R*(Ohm)	DC V	DC A	R*(Ohm)	DC V	DC A	R*(Ohm)	DC V	DC A	R*(Ohm)
1. Anod	20,20	40,60	0,50	4,80	8,70	0,55	7,00	13,50	0,52	3,20	4,20	0,76
2. Anod	20,00	40,60	0,49	4,80	8,00	0,60	7,30	11,10	0,66	4,00	4,00	1,00
3. Anod	10,00	24,70	0,40	0,00	24,70	0,00	0,00	1,00	0,00	4,20	3,20	1,31
4. Anod	14,90	12,30	1,21	4,50	9,10	0,49	7,30	11,70	0,62	4,00	3,60	1,11
5. Anot							7,60	8,80	0,86	4	4	1,00
		Ortalama	0,65			0,55			0,67			1,04
	P5A			P5B			P52			P52		
Anod No	DC V	DC A	R*(Ohm)	DC V	DC A	R*(Ohm)	DC V	DC A	R*(Ohm)	DC V	DC A	R*(Ohm)
1. Anod	19,90	32,90	0,60	11,10	20,20	0,55	2,70	2,70	1,00	5,90	10,00	0,59
2. Anod	15,10	19,40	0,78	10,20	20,30	0,50	2,70	1,60	1,69	6,50	11,50	0,57
3. Anod	20,40	30,30	0,67	10,20	19,90	0,51	2,50	2,60	0,96	6,40	9,90	0,65
4. Anod	21,50	28,50	0,75	10,80	20,90	0,52	2,70	2,40	1,13	6,50	8,90	0,73
5. Anot							2,6	2,7	0,96	6,8	10,8	0,63
		Ortalama	0,7			0,52			1,148			0,634

Bölüm 9.1 ve 9.2’de elde edilen akım ve gerilim değerleri kullanılarak hesaplanan anod geçiş dirençlerinin incelenmesinden görülmektedir ki anod dirençleri,

P4A	'da	0,40 ohm	ile	1,21 ohm	arasında
P41	'de	0,52 ohm	ile	0,66 ohm	arasında
P42	'da	0,79 ohm	ile	1,13 ohm	arasında
P4B	'de	0,49 ohm	ile	0,60 ohm	arasında
P5A	'da	0,60 ohm	ile	0,78 ohm	arasında
P51	'de	0,96 ohm	ile	1,69 ohm	arasında
P52	'de	0,57 ohm	ile	0,79 ohm	arasında
P5B	'de	0,50 ohm	ile	0,55 ohm	arasında
P3	'de	0,19 ohm	ile	0,32 ohm	arasında
P6	'da	0,40 ohm	ile	0,40 ohm	arasında değişmektedir.

Burada hesaplanan anod geçiş dirençleri ile Bölüm 7’de hesaplanan her ayağa ait toplam DC devre dirençleri aşağıya karşılaştırılmak amacıyla liste halinde çıkarılmıştır.

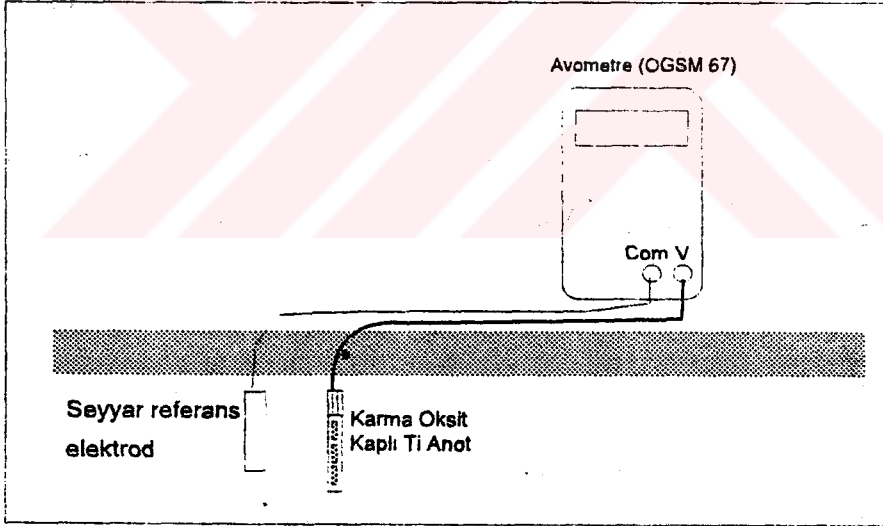
P3	DC devre direnci	: 0,1953 ohm
P6	DC devre direnci	: 0,18 ohm
P4A	DC devre direnci	: 1,39 ohm
P41	DC devre direnci	: 1,123 ohm
P42	DC devre direnci	: 1,123 ohm
P4B	DC devre direnci	: 1,39 ohm
P5A	DC devre direnci	: 1,39 ohm
P51	DC devre direnci	: 1,123 ohm
P52	DC devre direnci	: 1,128 ohm
P5B	DC devre direnci	: 1,39 ohm

SONUÇ: Anot dirençleri , anot boyutlarına ve zemin elektriksel özelliklerine ve anottan akım geçişi sırasında zemin-yüzey arasında oluşan reaksiyonların yüzey üzerinde bıraktıkları ürünlerin dirençlerine bağlı olarak değişmektedir. Anot dirençlerinin çok yüksek olması aynı miktarda akımın daha yüksek gerilimlerde geçmesine neden olmakta ve dolayısıyla enerji sarfiyatını arttırmaktadır. Dirençlerin aşırı yükselmesi sonunda T/R

ünitesinin DCV üst sınırı aşılsa istenilen akım çekilemez hale gelir. Bu projede kullanılan anotlar her bir grup için paralel bağlı olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla paralel bağlı anotlarda da toplam anot direnci düşecektir. Bu açıklamalar ışığı altında tek anot dirençleri değerlendirilirse tamamı 2 ohm'un altındadır ve ortalama tek anot direnci 0,74 ohm kadardır. (Çizelge 10.4) Kazık gruplarında 4 ve 5 anot paralel bağlıdır. Böylece 4 anot içeren kazık gruplarında toplam anot direnci ortalama 0,15 ohm ve 5 anot içeren kazık gruplarında anot direnci ortalama 0,21 ohm olmaktadır. Literatürde toplam anot dirençlerinin 2 ohm altında olması tercih edilmektedir. Bu değerle mukayese edildiğinde toplam anot dirençlerinin 0,5 ohm'un altında olması sistemde anot direncinin son derece düşük olduğunu ve bu değerlere göre sistemin düşük potansiyellerde akım çekmesi nedeniyle enerji sarfiyatının da az olacağını göstermektedir.

9.3. Anod Kablo Testleri

Bu test esnasında sisteme bağlı anodlara giden tüm kablolar ayrı ayrı kontrol edilecektir. Test için Şekil 9.3'deki düzenek kullanılır.



Şekil 9.3 Anod kablo testi için test düzeneği

Ölçmenin esası kabloların ucuna bağlı anotların (Karma oksit kaplı Ti anot) doğal potansiyelinin ölçülmesidir. İlgili referans elektroduna göre ayrı ayrı anodun potansiyeli ölçüldüğü takdirde anotlara giden kablolar da sağlam demektir. Buna göre, ölçmeleri yapabilmek amacıyla sırasıyla aşağıdakiler gerçekleştirilir.

- Tüm anotların kabloları birbirinden bağımsız hale getirilir.
- İlgili T/R ünitesindeki ölçülmesi gereken anodun yakınına seyyar referans elektrodu yerleştirilir.
- Şekil 9.3'deki düzeneğe göre devreye bağlanan ölçü aleti üzerinden anodun ilgili referans elektroduna göre olan doğal potansiyeli ölçülür.
- Her T/R ünitesindeki , her anot için tek tek ölçmeler yapılır.

19.10.1997 ve 07.08.1998 tarihinde gerçekleştirilen ölçme sonuçları Çizelge 9.5'de görülmektedir.

Çizelge 9.5'deki ölçmeler anodların polarizasyon potansiyellerinin ölçümü esasına dayanmaktadır. Amacı hem anot kablosunun sağlam olduğunu test etmek ve hem de anodun polarizasyon potansiyellerinin ölçümünü yapmaktır. Katotlar için de ölçme yapıldığı takdirde aynı durum söz konusudur. Hem katot kablosunun kopuk olup olmadığını test etmek, hem de katodun polarizasyon potansiyelini ölçmektir. Anod kablo testlerinden alınan 07.08.1998'deki değerler toplu olarak incelenirse;

P4-A'da	+1161 mV ile +1198 mV arasında	
P4-B'de	+1163 mV ile +1198 mV arasında	
P4-1'de	+1196 mV ile +1203 mV arasında	
P4-2'de	+1201 mV ile +1227 mV arasında	
P5-A'da	+1204 mV ile +1242 mV arasında	
P5-B'de	+1144 mV ile +1240 mV arasında	
P5-1'de	+960 mV ile +1026 mV arasında	
P5-2'de	+1000 mV ile +1273 mV arasında	olduğu görülür.

Karma oksit kaplı Ti anotların hiç akım vermeden doğal zeminler içindeki potansiyeli Ag/AgCl referans elektroda göre (-250 mV) – (-300 mV) arasındadır. Anottan akım geçtikçe bu değer + yöne doğru kayar. Bu kayma miktarı anodun polarizasyon değeridir ve anot olarak çalışma özelliğinin bir göstergesidir. Anot akımı kesildikten 15 sn sonra ölçülen potansiyel hiç akım geçmeden ölçülen potansiyel değeri olan 300 mV'dan büyük olması

anodun iyi çalıştığını ve ortam yüzey arasında oluşan reaksiyonlardan yüzeyin olumsuz etkilenmediğini göstermektedir. Anot kablolarından ölçülen polarizasyon potansiyelleri en

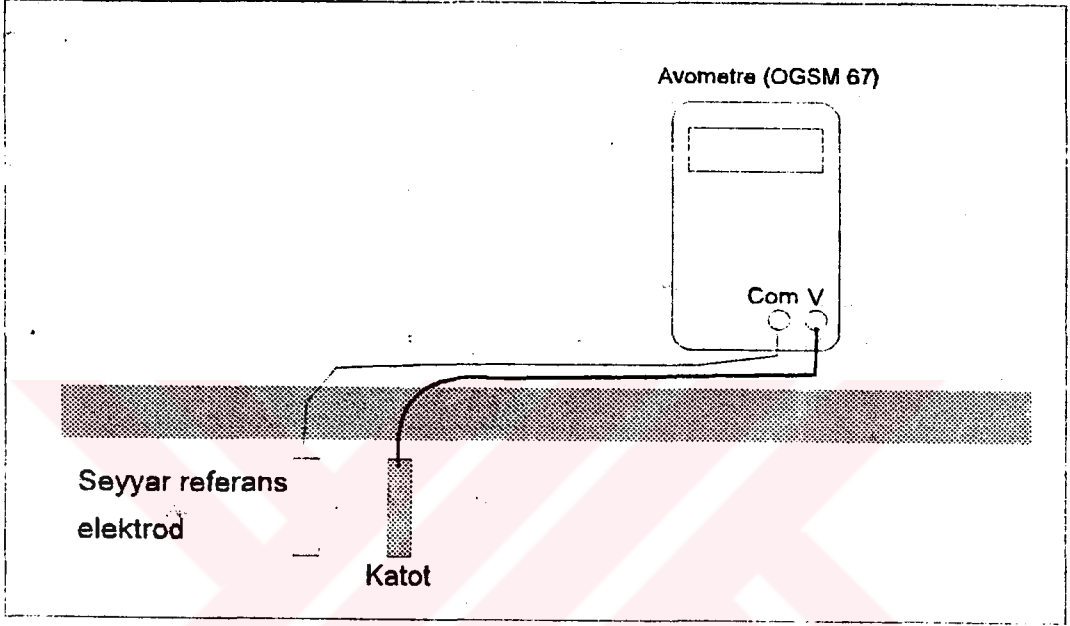
düşük +960 mV ve en yüksek +1204 mV'dur. Böylece anotlar en az $960+250=1204+250=1454$ mV'luk bir polarizasyon kayması göstermektedir. Bu değerlerde bu ortam için seçilmiş anot malzemelerinin uygun olduğunu ve anotların verimli olarak çalıştığını göstermektedir. 19.10.1997 tarihinde anot ölçme sonuçlarının (-) çıkması anot metalinin polarize olmamasındandır. Anoda gerilim uygulandığında anot potansiyeli (+) yönde kayma göstermiştir.

Çizelge 9.5 Anod kablo test ölçmelerine ait sonuçlar

			19.10.1997	07.08.1998	
Ayak Grubu	Anot Numarası	Ref.Elkt.Türü	Okunan Potansiyel (mV)	Okunan Potansiyel (mV)	
P3	Derinkuyu	Cu/CuSO ₄	-405	1080	
P6	Derinkuyu	Cu/CuSO ₄	-440	990	
P4	A	1	Ag/AgCl	-257	1185
		2	Ag/AgCl	-190	1172
		3	Ag/AgCl	-290	1161
		4	Ag/AgCl	-529	1198
	1	1	Ag/AgCl	-350	1196
		2	Ag/AgCl	-314	1202
		3	Ag/AgCl	-112	455
		4	Ag/AgCl	-79	1200
		5	Ag/AgCl	-283	1203
	2	1	Ag/AgCl	-966	1201
		2	Ag/AgCl	-245	1211
		3	Ag/AgCl	-267	1225
		4	Ag/AgCl	-272	1230
		5	Ag/AgCl	-253	1227
	B	1	Ag/AgCl	-180	1163
		2	Ag/AgCl	-182	1180
		3	Ag/AgCl	-314	0
		4	Ag/AgCl	-283	1198
P5	A	1	Ag/AgCl	-305	1204
		2	Ag/AgCl	-340	1203
		3	Ag/AgCl	-257	1205
		4	Ag/AgCl	-190	1242
	1	1	Ag/AgCl	-290	960
		2	Ag/AgCl	-329	992
		3	Ag/AgCl	-350	1023
		4	Ag/AgCl	-320	1026
		5	Ag/AgCl	-212	1036
	2	1	Ag/AgCl	-179	1000
		2	Ag/AgCl	-203	1172
		3	Ag/AgCl	-266	1203
		4	Ag/AgCl	-256	1222
		5	Ag/AgCl	-260	1272
	B	1	Ag/AgCl	-234	1144
		2	Ag/AgCl	-232	1184
		3	Ag/AgCl	-176	1190
		4	Ag/AgCl	-145	1240

9.4. Katot Kablo Testleri

Bu test esnasında sisteme bağlı bütün katotlardan gelen bağlantı kabloları ayrı ayrı kontrol edilir, test için Şekil 9.4'deki düzenek kullanılır.



Şekil 9.4 Katot kablo testleri için test düzeneği

Ölçmenin esası anod kablo testindeki açıklamalar ile aynıdır. Buna göre;

- Tüm katotlardan gelen kablolar birbirinden bağımsız hale getirilir.
- İlgili T-R ünitesindeki ölçülmesi gereken katodun yakınına seyyar referans elektrodu yerleştirilir.
- Şekil 9.4'deki düzeneğe göre devreye bağlanan ölçü aleti üzerinden çelik katodun ilgili referans elektroduna göre olan doğal potansiyeli ölçülür.
- Literatürdeki doğal potansiyeli ile karşılaştırılır.
- Her T/R ünitesindeki, her katot kablosu için tek tek ölçmeler yapılır.

19.10.1997 ve 07.08.1998 tarihlerinde gerçekleştirilen test sonuçları Çizelge 9.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 9.6 Katot kablo test sonuçları

Ayak Grubu	Anot Numarası	Ref.Elkt. Türü	19.10.1997	07.08.1998
			Okunan Potansiyel (mV)	Okunan Potansiyel (mV)
P3	Palplanş(A)	Cu/CuSO ₄	-614	-740
	Palplanş(B)	Cu/CuSO ₄	-614	-730
	1 (Kazık)	Cu/CuSO ₄	-614	-730
	1(Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-614	-723
	2 (Kazık)	Cu/CuSO ₄	-614	-730
	2 (Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-614	-733
	B (Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-614	-688
	B (Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-614	-688
P6	Palplanş(A)	Cu/CuSO ₄	-570	-730
	Palplanş(A)	Cu/CuSO ₄	-570	-730
	2 (Kazık)	Cu/CuSO ₄	-570	-670
	2(Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-570	-710
	3 (Kazık)	Cu/CuSO ₄	-570	-680
	3 (Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-570	-670
	B (Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-570	-730
	B (Palplanş)	Cu/CuSO ₄	-570	-730
P4	A-1	Ag/AgCl	-668	-798
	A-2	Ag/AgCl	-668	-798
	1	Ag/AgCl	--	-847
	1	Ag/AgCl	--	-847
	2	Ag/AgCl	--	-853
	2	Ag/AgCl	--	-853
	B-1	Ag/AgCl	-668	-763
	B-1	Ag/AgCl	-668	-763
P5	A-1	Ag/AgCl	-610	-795
	A-2	Ag/AgCl	-610	-795
	1	Ag/AgCl	--	-613
	1	Ag/AgCl	--	-613
	2	Ag/AgCl	--	-640
	2	Ag/AgCl	--	-640
	B-1	Ag/AgCl	-610	-814
	B-2	Ag/AgCl	-610	-814

Katot kablo testlerinden alınan sonuçlar toplu olarak incelenirse;

P4-A'da -668 mV ile -799 mV arasında

P4-B'de -668 mV ile -763 mV arasında

P4-1'de -847 mV

P4-2'de -853 mV

P5-A'da -610 mV ile -795 mV arasında

P5-B'de -610 mV ile -814 mV arasında

P5-1'de -613 mV

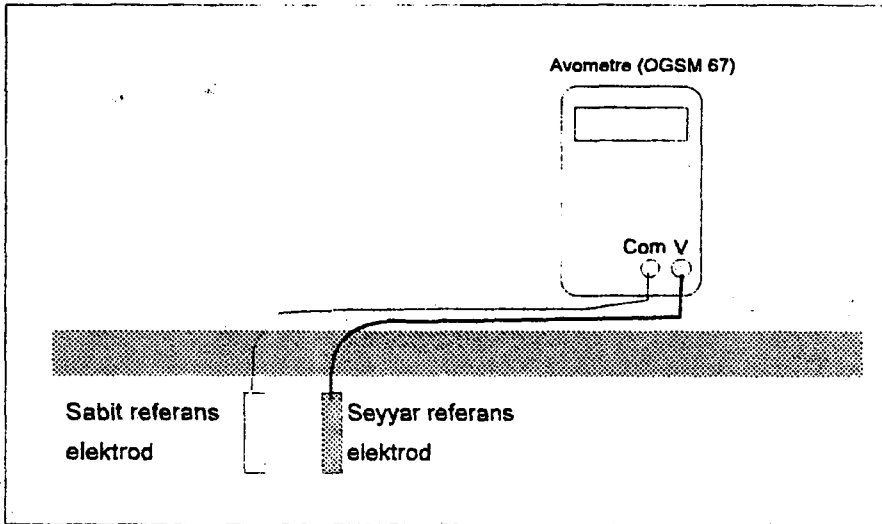
P5-2'de	-640 mV
P3'de	-614 mV ile -740 mV arasında
P6'da	-570 mV ile -730 mV arasında olduğu görülmektedir.

Katot kablo testlerinde de katot polarizasyonları ölçülmüştür. Literatürde ve standartlarda (TS 5141, BS CP 1021) çelik metal yapının zemin içine konulduğu an ve hiç akım verilmeden önceki potansiyel değeri ile akım kesildikten 15 sn sonra ölçülen potansiyel değeri arasındaki fark katodik polarizasyon kayması olarak tanımlanmakta ve kriterinin sağlanması halinde bu farkın en az 100 mV olması gerekmektedir.

Çelik boruların doğal zeminler ve sular içindeki doğal potansiyeli Cu/CuSO_4 referans elektroda göre ise -375 mV ile -575 mV arasında değişmektedir. Bu değer katodik yönde 100 mv daha kayınca -475 mV ile -675 mV değeri elde edilir. Katot kablo testinde elde edilen katot polarizasyon değerlerinin -763 mV ile -853 mV arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerler katot konumunda bulunan kazıklarda standartlarda verilen koruma kriterinin sağlandığını göstermektedir.

9.5. Referans Elektrodların Kontrolü

Bu testin amacı sistemde kullanılan tüm referans elektrodların kontrolünü yapmaktır. Test için Şekil 9.5'deki düzenek kullanılır.



Şekil 9.5 Referans elektrodların kontrolü için test düzeneği

İlgili sabit tip referans elektrodu aynı tip seyyar bir referans elektrodu ile test edilecektir. Düzenekte kullanılan ölçü aletinin iç direnci en az 10^5 ohm/volt olmalıdır. Ölçmenin esası sabit tip referans elektrodu ile seyyar referans elektrodu arasındaki potansiyelin ölçülmesidir. Potansiyel fark 50 mV'dan fazla olmamalıdır. Ölçme esnasında direnç etkisini azaltmak amacıyla her iki elektrod mümkün olduğu kadar birbirine yakın tutulmalıdır. Her iki referans elektrodu için tek tek ölçme yapılmıştır. 19.10.1997 ve 07.08.1998 tarihleri arasında gerçekleştirilen test sonuçları Çizelge 9.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 9.7 Referans elektrod kontrolü sonuçları

Ayak Grubu	Ref.Elekt. Numarası	Sabit Ref.Elekt.	19.10.1997		07.08.1998	
			Seyyar Ref.Elek.	Ölçülen Potansiyel (mV)	Seyyar Ref.Elek.	Ölçülen Potansiyel (mV)
P3	1.	Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl	0,004	Ag/AgCl	-71
	2.			0,007		-93
	3.			0,006		-60
	4.			0,012		-60
	5.			0,008		-17
	6.			0,004		-53
P4	B-1	Ag/AgCl	Ag/AgCl	0,003	Ag/AgCl	-427
	B-2			0,002		-863
	2-1			0,001		-418
	2-2			0,001		-436
	1-1			0,001		-103
	1-2			0,004		-298
	A-1			0,002		-331
	A-2			0,000		-368
P5	B-1	Ag/AgCl	Ag/AgCl	0,000	Ag/AgCl	-524
	B-2			0,002		-550
	2-1			0,001		-123
	2-2			0,001		-148
	1-1			0,002		-581
	1-2			0,001		-516
	A-1			0,000		-522
	A-2			0,001		-442
P6	1.	Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl	0,008	Ag/AgCl	-82
	2.			0,004		-56
	3.			0,006		-63
	4.			0,007		-19
	5.			0,005		-53
	6.			0,010		-47

Referans elektrodların kontrolü amacıyla yapılacak değerlendirme için 19.10.1997 ve 07.08.1998 tarihlerindeki ölçüm değerleri Çizelge 9.8'de yan yana gösterilmektedir.

Çizelge 9.8 Referans elektrod kontrol sonuçları

Ayak Grubu	19.10.1997		07.08.1998	
	1.Ref.Elek.(mV)	2.Ref.Elek.(mV)	1.Ref.Elek.(mV)	2.Ref.Elek.(mV)
P4-A	0.001	0.000	-331	-368
P4-B	0.003	0.002	-275	-281
P4-2	0.004	0.002	-418	-436
P4-3	0.001	0.001	-103	-298
P5-A	0.000	0.001	-522	-442
P5-B	0.000	0.002	-524	-550
P5-2	0.002	0.001	-581	-516
P5-3	0.001	0.001	-123	-148

Referans elektrodlar 1997 yılının 9. ayında monte edilmiş ve 19.10.1997 tarihinde de ölçümleri alınmıştır. Bu tarihteki ölçme esnasında seyyar ref. elektrod ile sabit tip referans elektrodlar arasında herhangi bir potansiyel farkı mevcut değildir. Aradan yaklaşık 10 ay geçtikten sonra 07.08.1998 tarihinde yapılan ölçmeden anlaşıldığına göre bu süre içinde sabit referans elektrodun doğal potansiyeli ile seyyar referans elektrodun doğal potansiyeli arasında oldukça büyük bir fark oluşmuştur. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir:

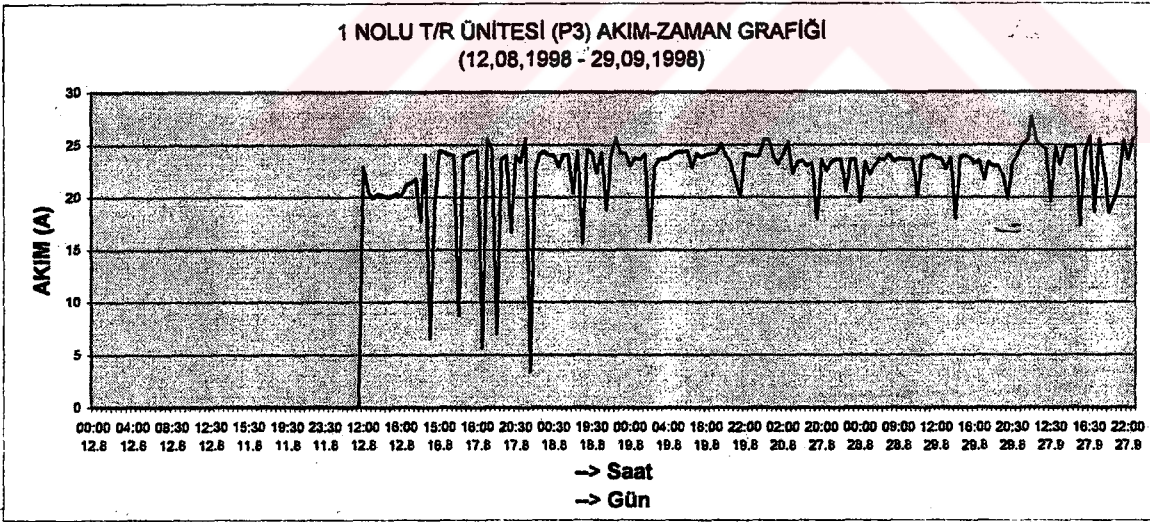
Tamamı orijinal olan Ag/AgCl referans elektrodlar 3 m derinlikteki Haliç çamurunun içine yerleştirilmişlerdir. Referans elektrodların kabloları sağlamdır. Kablo kopukluğu olsaydı ya hiç değer okuyamazdık (kopuk sinyali) ya da bakırın potansiyelini okumuş olurduk. Yani referans elektrodlar yerinde sağlamca bulunmakta ancak yüzeye konulan seyyar referans elektrod ile 3 m derinlikteki sabit referans elektrod arasında potansiyel farkı beklenenden büyük çıkmaktadır. Durumu incelediğimizde Haliç'in yüzey suyunun temizlenmiş olduğu ve dip çamur kısmı ile yüzey suyu arasında çok büyük bir farkın olduğu görülmüştür. 10 aylık dönem içinde Haliç'te bir temizleme işleminin yapıldığı bu işlem sırasında yüzey suyunun çok değiştiği ve bu değişme sonunda dip çamuru ile yüzey suyu arasında çözünmüş oksijen dengesinin çok bozulduğu kanaatindeyim. Böyle yüzeye konulan seyyar referans elektrod ile çamur içinde bulunan sabit referans elektrod oksijen konsantrasyonu çok farklı olan iki ayrı ortamdaymış gibi potansiyel davranış

göstermektedir. Bunun sonucu olarak da iki elektrod arasında fazla bir potansiyel farkı oluşmuştur. Bu farkın olumsuz etkisinin giderilmesi için,

- T/R ünitelerinde referans elektrod potansiyeli gerçek değere göre kalibre edilebilir.
- Yüzeye yakın yere yani sabit referans elektrod monte edilip, T/R üniteleri bu referans elektrotlardan alınan bilgi ile komutlandırılabilir

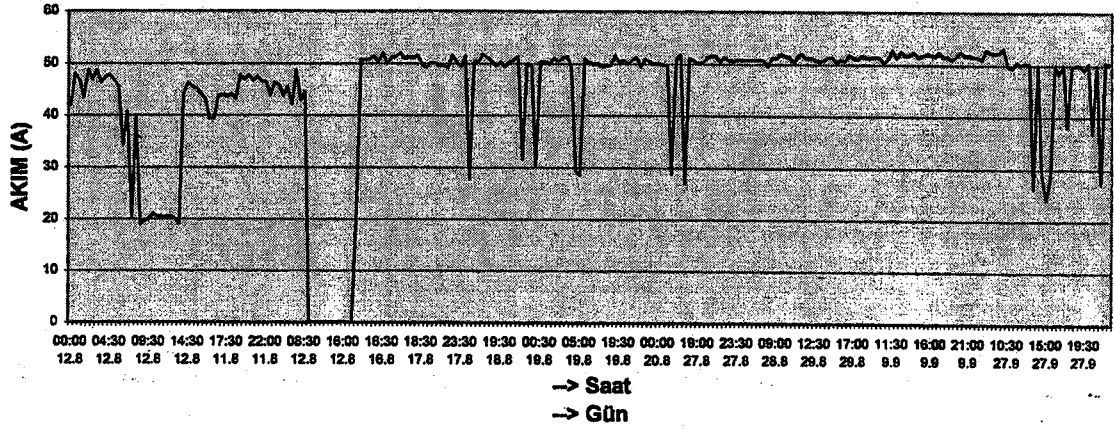
Öncelikle çözüm olarak T/R üniteleri referans elektrod potansiyelinin gerçek değerine göre kalibre edilmiştir. Ancak kalibrasyonu sık sık değiştirmenin otomatik sistemde meydana getireceği sakıncaları da göz önünde bulundurarak yüzeye yakın referans elektrod monte edilmesi gerekmektedir. Çizelge 11.8'de görüldüğü gibi P3 ve P6 ayaklarında potansiyel farkı okunmaması gerekmesine rağmen (-17) ile (-93) mV arasında değişen potansiyel farkları okunmuştur. Halbuki karadadaki referans elektrotlarda denizde olduğu gibi bir ortam değişikliği yaşanmamıştır. Potansiyel fark okunmasının sebebi seyyar referans elektrod olarak Ag/AgCl referans elektrodu kullanılmasıdır. Cu/CuSO₄ ile Ag/AgCl arasında zaten doğal potansiyel fark mevcuttur.

9.6. Akım İncelemeleri ve Yorumlar



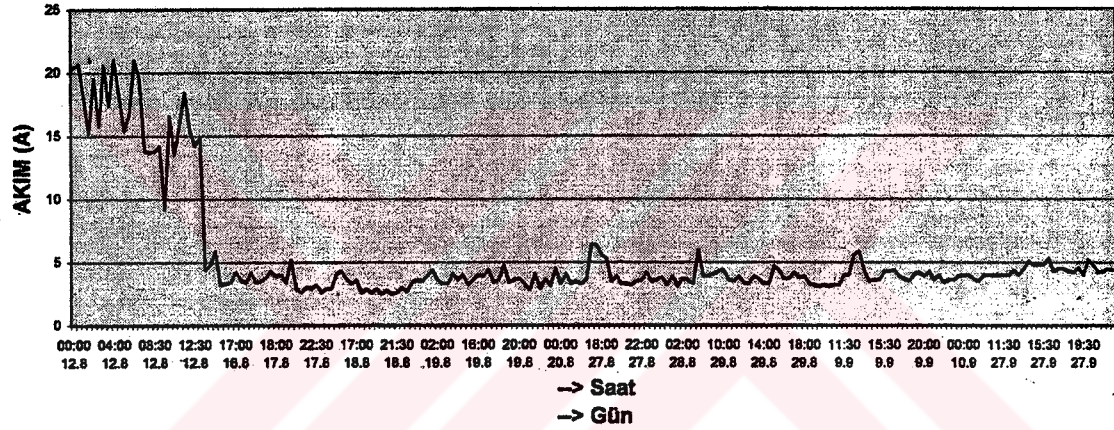
Şekil 9.6 (a) T/R üniteleri akımının zamana göre değişimi

2 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-A) AKIM-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



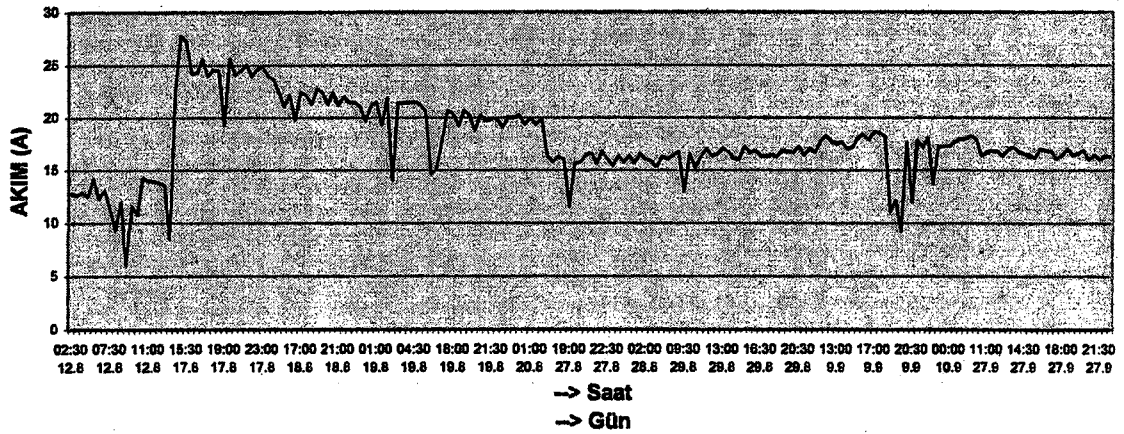
(b)

3 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-1) AKIM-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



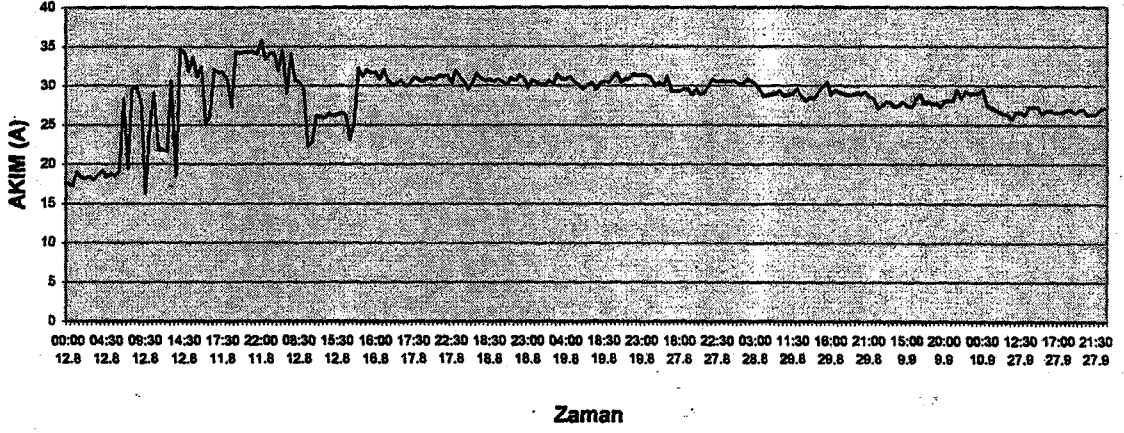
(c)

4 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-2) AKIM-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



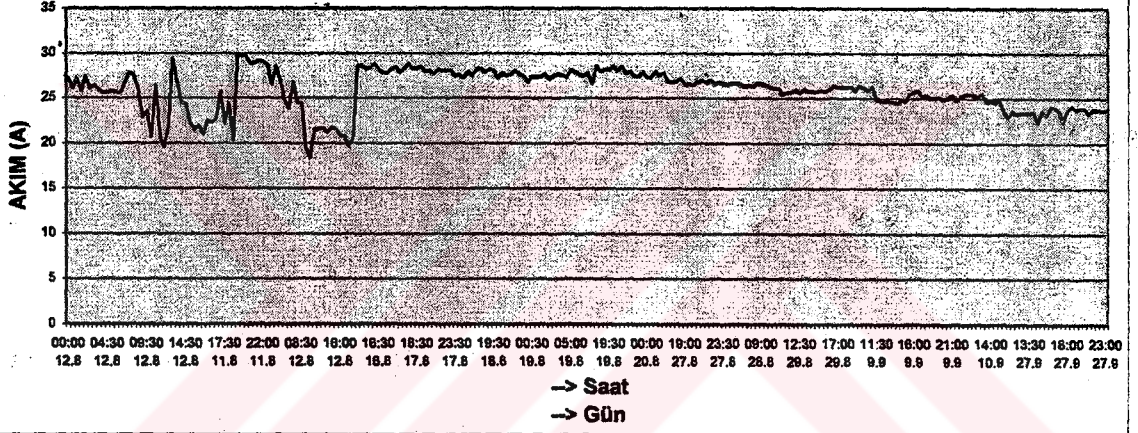
(d)

5 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-B) AKIM-ZAMAN GRAFIĞI
(12,08,1998 - 29,09,1998)



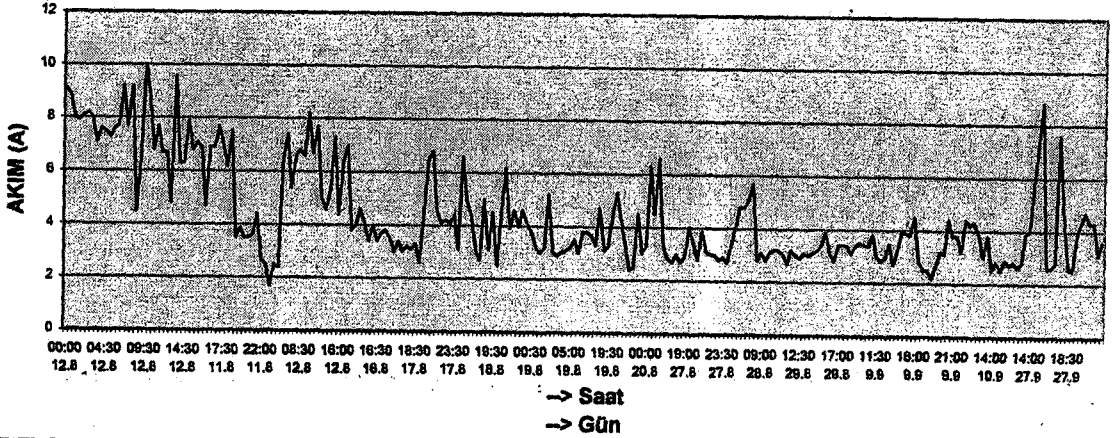
(e)

6 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-A) AKIM-ZAMAN GRAFIĞI
(12,08,1998 - 29,09,1998)



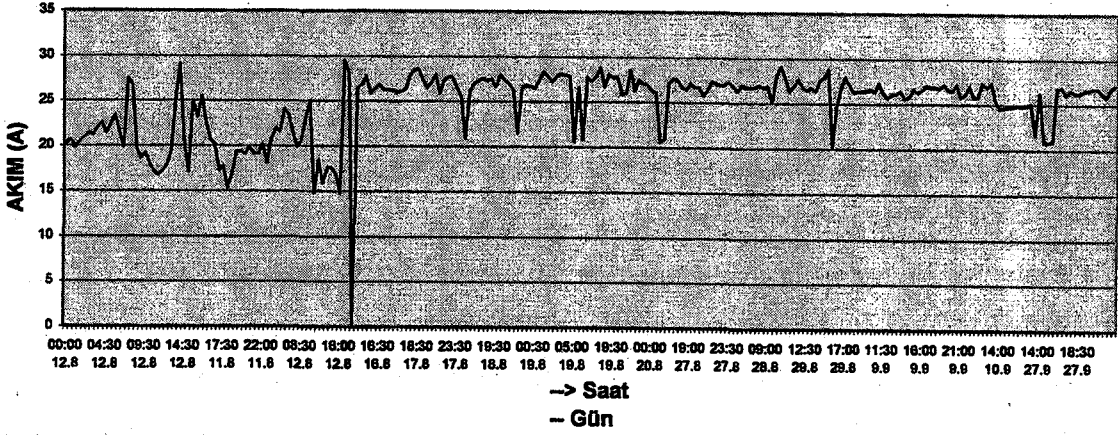
(f)

7 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-1) AKIM-ZAMAN GRAFIĞI
(12,08,1998 - 29,09,1998)



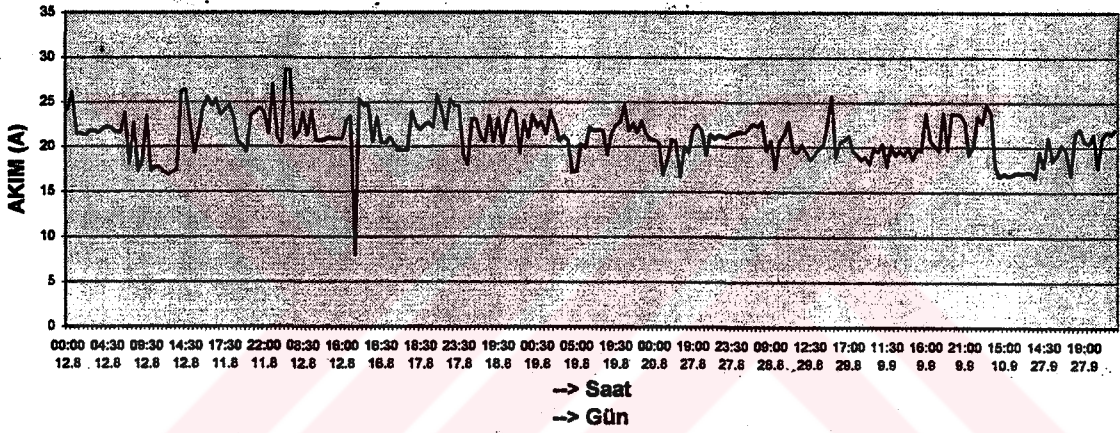
(g)

8 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-2) AKIM-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



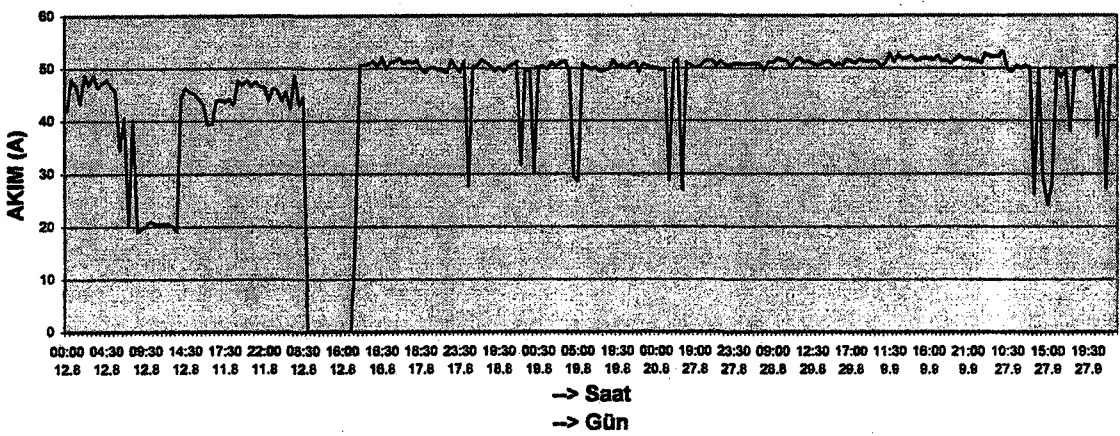
(h)

9 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-B) AKIM-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



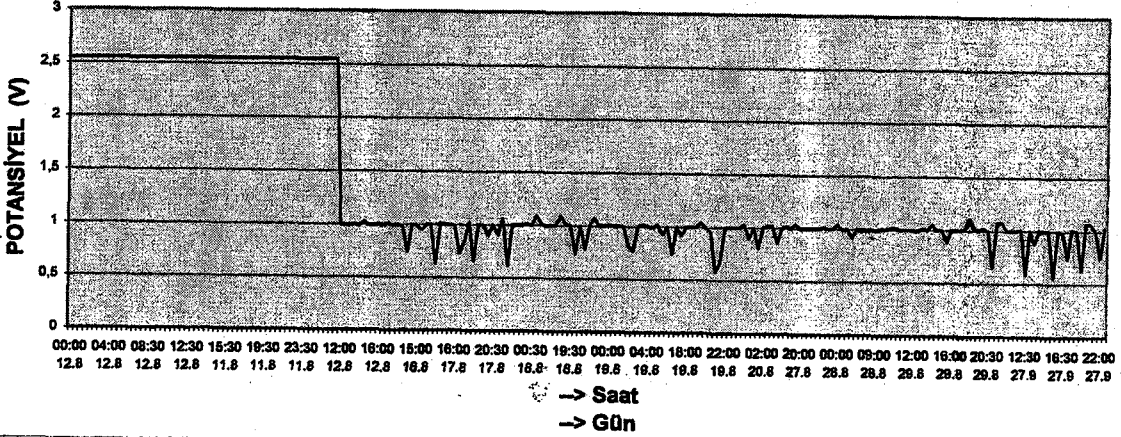
(i)

10 NOLU T/R ÜNİTESİ (P6) AKIM-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



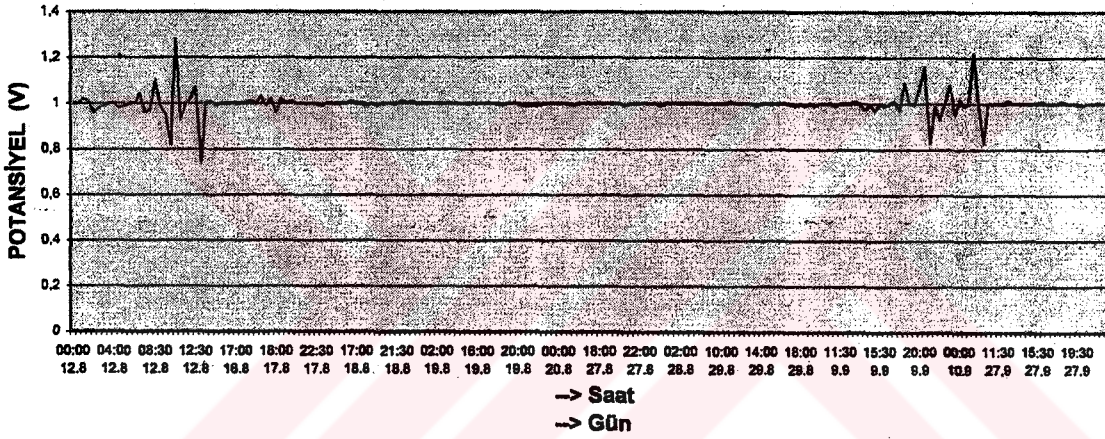
(j)

1 NOLU T/R ÜNİTESİ (P3) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



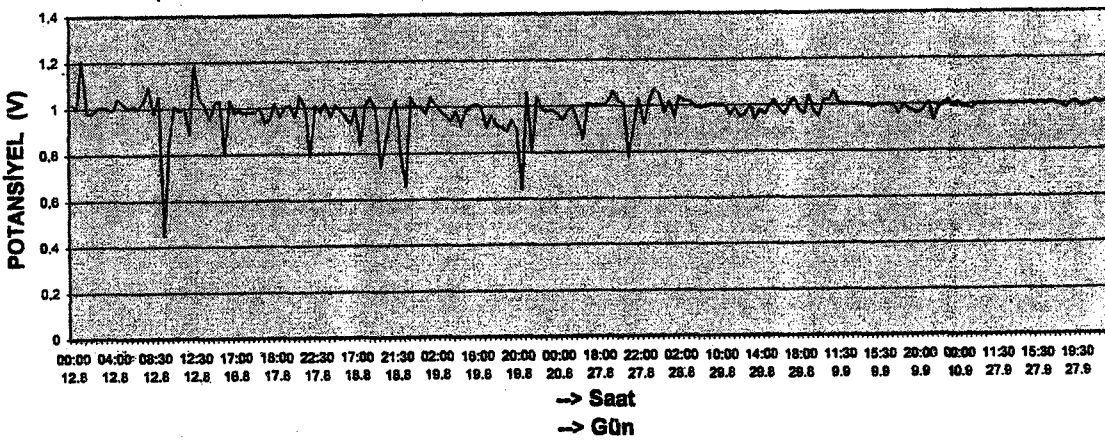
Şekil 9.7 (a) Kazık zemin potansiyelinin zamana göre değişimi

2 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-A) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



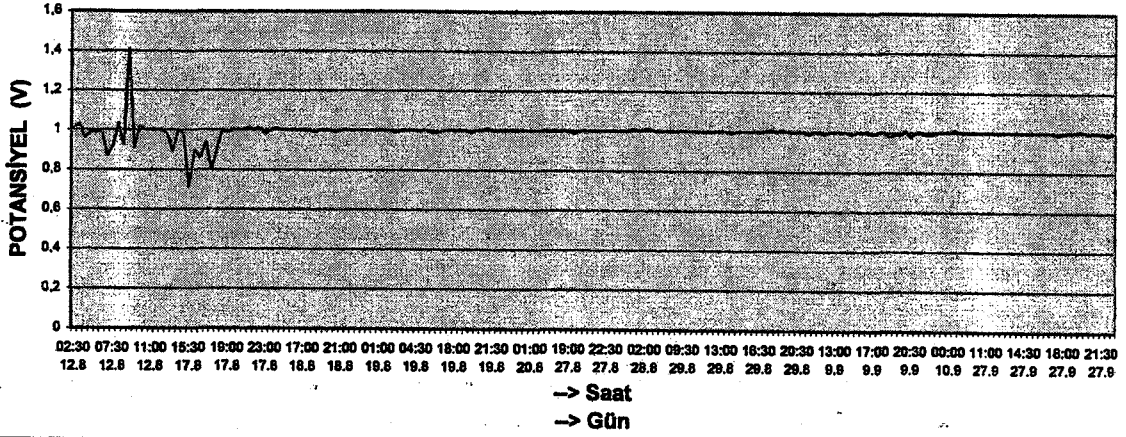
(b)

3 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-1) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



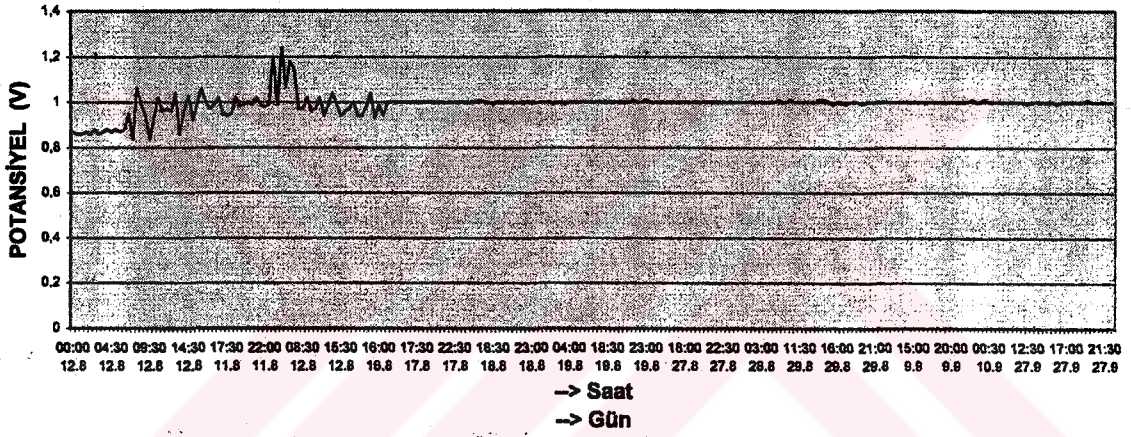
(c)

4 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-2) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



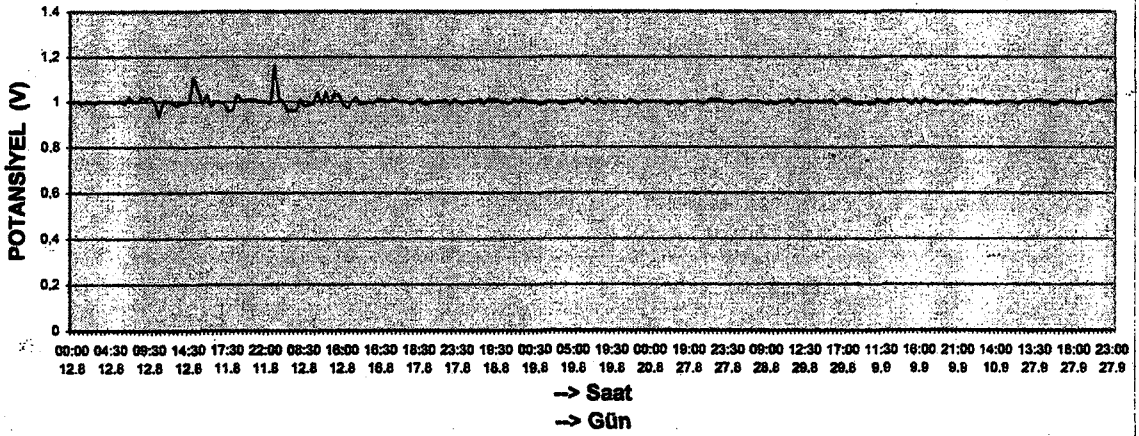
(d)

5 NOLU T/R ÜNİTESİ (P4-B) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



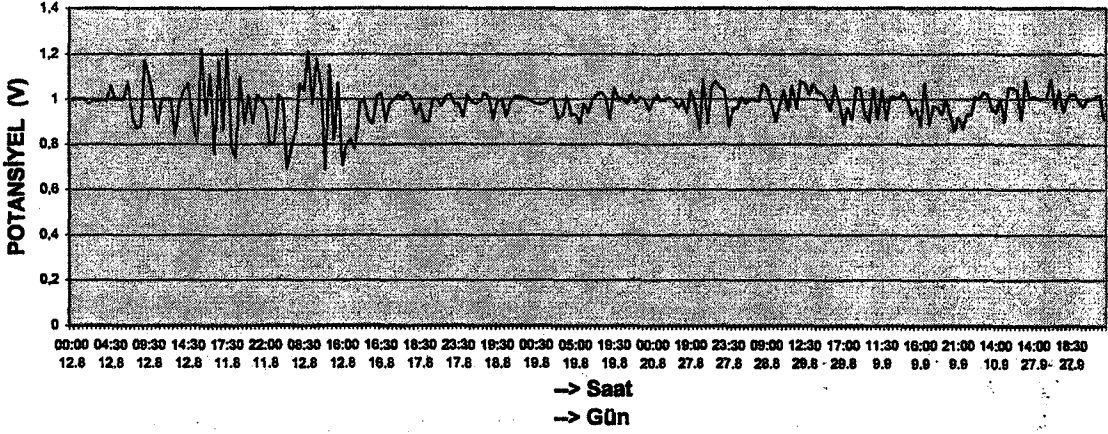
(e)

6 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-A) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFİĞİ
(12,08,1998 - 29,09,1998)



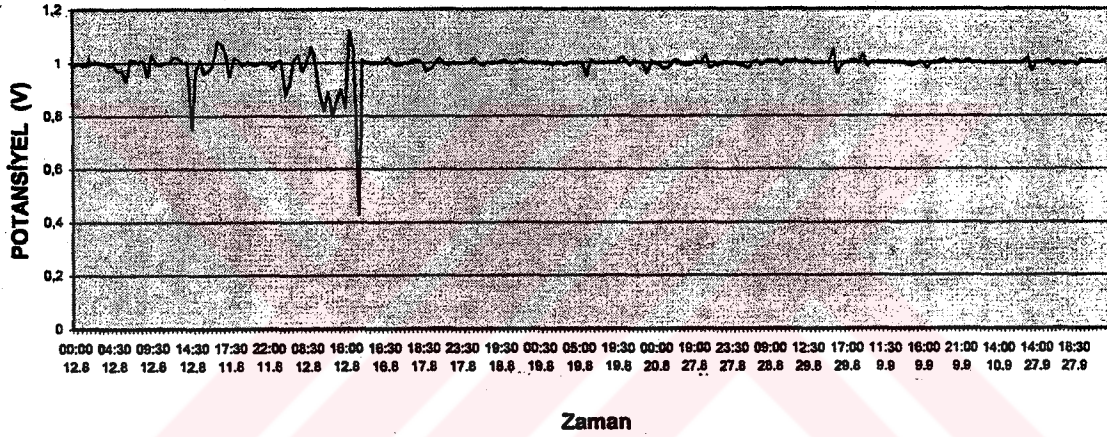
(f)

7 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-1) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFIĞI
(12,08,1998 - 29,09,1998)



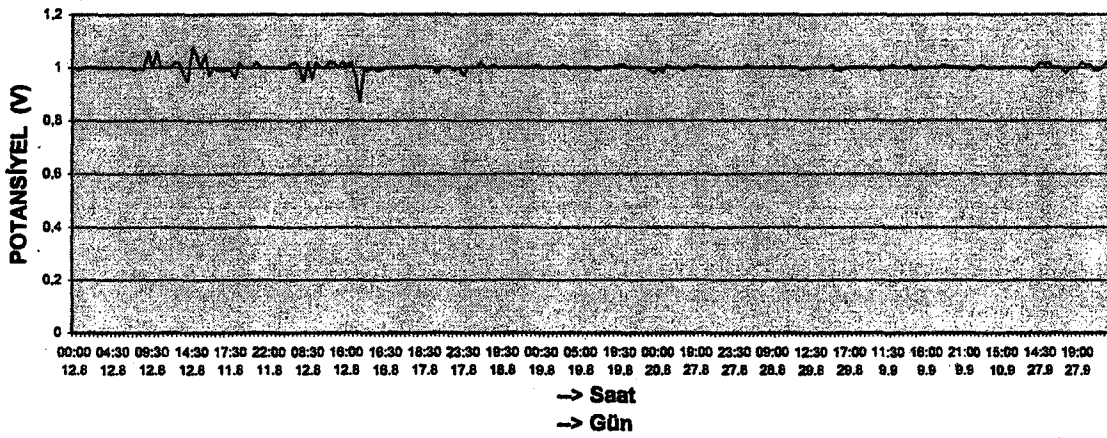
(g)

8 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-2) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFIĞI
(12,08,1998 - 29,09,1998)



(h)

9 NOLU T/R ÜNİTESİ (P5-B) POTANSİYEL-ZAMAN GRAFIĞI
(12,08,1998 - 29,09,1998)



(i)

9.6.1. Ayvansaray-Halıcioğlu eksenindeki ayak akımlarının incelenmesi

Bu incelemede Ayvansaray-Halıcioğlu ekseninde bulunan ayaklardan;

P4A - P5A ile

P41 - P51 ile

P42 - P52 ile

P4B - P5B ile

P3 - P6 ile

bunların T/R ünitelerinden çektikleri akımların karşılaştırılması yapılacaktır. Karşılaştırılması yapılacak ayakların hesaplanan projelendirme akımları Çizelge 7.10'da verilmiştir. Çizelge 7.10 kullanılarak her ayağın projelendirme akım ihtiyacı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$P4A = P4B = P4 \text{ (Yeni)} / 2 = 39,3/2 = 19,65 \text{ Amper}$$

$$P5A = P5B = P4 \text{ (Yeni)} / 2 = 43/2 = 21,5 \text{ Amper}$$

$$P41 = P42 = P4 \text{ (Eski)} / 2 = 45,5/2 = 22,75 \text{ Amper}$$

$$P51 = P52 = P4 \text{ (Eski)} / 2 = 49,8/2 = 24,9 \text{ Amper}$$

T/R ünitelerinden 12.08.1998 – 27.09.1998 tarihleri arasında çekilen akımlar Şekil 9.6 (a) ile (j) arasında akım-zaman grafikleri halinde çizilmiştir. Bu grafikler sayesinde tespit edilen ayaklara ait ortalama akımlar aşağıya çıkarılmıştır.

$$P4A = 45 \text{ Amper}$$

$$P5A = 26 \text{ Amper}$$

$$P41 = 3 \text{ Amper}$$

$$P51 = 3 \text{ Amper}$$

$$P42 = 18 \text{ Amper}$$

$$P52 = 24 \text{ Amper}$$

$$P4B = 30 \text{ Amper}$$

$$P5B = 26 \text{ Amper}$$

Aynı eksen üzerindeki ayakların projelendirme akımlarının arasındaki farklar % olarak aşağıda hesaplanmıştır.

$$P4A/P5A = 19,65 / 21,5 = 0,91 = \%91$$

$$P4B/P5B = 19,65 / 21,5 = 0,91 = \%91$$

$$P41/P51 = 22,75 / 24,9 = 0,91 = \%91$$

$$P42/P52 = 27,75 / 24,9 = 0,91 = \%91$$

Her ayağın projelendirme akım ihtiyacı ile sistem işletmeye alındıktan sonra ölçülen gerçek akım ihtiyaçları arasındaki farklar ve bunların %'leri aşağıda hesaplanmıştır.

	<u>Projelendirme Akımı</u>	<u>Ölçülen Akım</u>	<u>Fark</u>	<u>%</u>
P4A için :	19,65 A	45 A	+25,35 A	%129 (Artış)
P41 için :	22,75 A	3 A	-19,75 A	%658 (Azalma)
P42 için :	22,75 A	18 A	-19,75 A	%26 (Azalma)
P4B için:	19,75 A	30 A	+10,35 A	%53 (Artış)
P5A için:	21,5 A	26 A	+4,5 A	%20 (Artış)
P51 için:	24,9 A	3 A	-21,9 A	%730 (Azalma)
P52 için:	24,9 A	25 A	-0,9 A	%3 (Azalma)
P5B için:	21,5 A	26 A	+4,5 A	%20 (Artış)

Yorumlar

- P5 ayak grubunun yüzey alanı P4 ayak grubuna göre daha fazla olduğundan P5 ayak grubunda bulunan ayakların P4'e göre daha fazla akım çekmesi beklenmelidir. Halbuki P4 ayak grubundaki ayaklarda daha fazla akım çekilmektedir.

$$P4 \text{ Ayak grubu akımı} : 45+3+18+30 = 96 \text{ Amper}$$

$$P5 \text{ ayak grubu akımı} : 26+3+24+26 = 79 \text{ Amper}$$

Bunun sebebi Ayvansaray tarafına yakın olan P4 ayak grubu bölgesindeki deniz çamurunun ve zeminin P5'e göre rezistivitesinin daha az olmasıdır, denilebilir Çünkü kuzey yönündeki Kağıthane ve Alibey derelerinden gelen tatlı suların kuzey bölgesi olan Halıcıoğlu kıyılarında iletkenliği arttırmaktadır. Bu tarihten sonra Haliç bölgesinde gerçekleştirilecek herhangi bir katodik koruma çalışmasında Ayvansaray kıyısına yakın olan ayakların Halıcıoğlu kıyısına yakın olan ayaklara göre daha fazla akım çekeceği göz önünde bulundurularak projelendirilme yapılmalıdır. Tüm projelendirme kriterleri ve

yüzey alanları eşit olması halinde bile yeni yapılacak bir projelendirme ve kullanılacak ilave kriter

$100-91 = 9$ (%9), $79/96 = 0,82$ $100-82 = 18$ (%18) $\%18 + \%9 = \%27$ bulunur.

Bundan sonraki projelendirmelerde Ayvansaray kıyısındaki ayakların %27 daha fazla akım çekeceği varsayılarak projelendirme yapılmalıdır. Ancak tarama, temizlik gibi dış müdahalelerle Haliç çamurunda herhangi bir değişiklik olduğunda çamur içinde tekrar test yapılmalıdır.

Aynı eksen üzerinde bulunan P4 ayak grubundaki ayaklarla P5 ayak grubundaki ayakların tek tek karşılaştırılmaları halinde de görülmektedir ki,

P4A akımı > P5A akımı

P41 akımı > P51 akımı

P42 akımı > P52 akımı

P4B akımı > P5B akımı 'dır.

Böylece P4 ayak grubundaki ayakların da P5 ayaklarına göre daha fazla akım çektiği anlaşılmaktadır.

P41, P42, P51 ve P52 ayaklarından oluşan eski köprü ayaklarının çektiği akım projelendirme esnasında hesaplanan akım ihtiyacına göre daha düşüktür. Hatta P41 ve P51 ayaklarında ölçülen akımlar projelendirme akımından ortalama 7 kat (%700) daha düşüktür. Yeni köprü ayak kazıklarının çektiği akım ölçüldüğünde ise projelendirme akımının üzerinde olduğu görülmektedir. 26 yıldır katodik koruma yapılan Eski Haliç Köprüsünün kazıklarında olduğu gibi uzun süre deniz suyu veya zeminde kalmış kazıkların katodik koruma projelendirilmesi esnasında akım ihtiyacı literatürde görülenden daha düşük alınmalıdır. Bunun sebebi eski kazıkların yeni kazıklara göre pasifliğinin daha yüksek olmasıdır. Genelleştirmek gerekirse; Katodik koruma uygulanarak uzun süre deniz veya çamur içinde kalmış çelik kazıkların akım ihtiyacı ilk kuruluş akım ihtiyacına göre azalacaktır, denilebilir. Bunun tersi olarak yeni çakılan çelik kazıklarda bir süre literatürdeki akım ihtiyaçlarından fazla akım çekecektir, denilebilir. Şayet gözlemleme devam edilirse her iki çelik kazık grubunun aynı akımı çekmeğe başlayacağı tahmin edilmektedir.

- Her ayak grubundaki ayakların ve bağımsız olarak tek tek ayakların yukarıdaki incelemelerinin neticesinde Ayvansaray ve Halıcıoğlu kıyısındaki deniz çamurun yapısı

(rezistivitesi vb.) hakkında fikir edinildi. Ancak buna rağmen ayakların eşit miktarlarda akım çekmediği görülmektedir. Bunun sebebi, Haliç çamurunun her ayağın etrafında farklı özelliklere sahip olmasındandır. Yani Haliç suyu ve çamuru homojen değil heterojen bir yapıya sahiptir. Daha önceki bölümlerde jeoteknik raporunda da görüldüğü üzere kazıkların içerisinde bulunduğu zeminin dikey olarak farklı katmanlardan oluştuğu yani heterojen bir özellik gösterdiği anlaşılmıştı. Buradaki incelemeler neticesinde Haliç suyu ve çamurunun da yatay dağılımda dereler ve sanayi atıkları sebebiyle heterojen bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır.

9.6.2. P3 ve P6 ayak akımlarının incelenmesi

Bu incelemede P3 ve P6'nın çektiği akımlar incelenerek P3 ve P6 ayak bölgesindeki zemin hakkında fikir yürütülecektir. İnceleme için Çizelge 7.10'da her iki ayağın projelendirme akımları aşağıya çıkarıldı.

P3	Ayağı (Eski)	= 20,9 Amper
P6	Ayağı (Eski)	= 30,6 Amper
P3	(Palplanj)	= 10 Amper
P6	(Palplanj)	= 10 Amper

12.08.1998 – 27.09.1998 tarihleri arasında ölçülen ve Şekil 9.6 (a) ile (j) arasında verilen akım-zaman grafiklerinin ortalaması alınarak elde edilen P3 ve P6 toplam akımları da aşağıya çıkarılmıştır.

P3 = 24 Amper

P6 = 50 Amper

Bu değerler kullanılarak projelendirme akımı ile ölçülen akım arasındaki % farklar hesaplanır.

	<u>Projelendirme Akımı</u>	<u>Ölçülen Akım</u>	<u>Fark</u>	<u>%</u>
P3 için:	20,9+10=30,9 A	24 A	+6,9 A	%22 (Azalma)
P6 için:	30,6+10=40,6 A	50 A	-9,4 A	%23 (Artış)

Yorum

- P3 ayak kazıklarının bulunduğu Ayvansaray kıyı zemini projelendirme akımından %22 daha az akım çekmektedir. P6'nın bulunduğu Halıcıoğlu kıyı zemini ise projelendirme akımından %23 daha fazla akım çekmektedir. P3 ve P6 ayaklarının yanındaki palplanjların

yüzey alanının tamamı deniz ve deniz çamuru içerisinde olduğundan Her iki ayak arasında sağlıklı bir zemin karşılaştırması yapabilmek zordur. Zemin içinde bulunan kazıklar için ayrı, deniz içinde bulunan palplanjlar için ayrı değerlendirme yapılmalıdır. Eski katodik koruma sisteminden ölçülen akımlar incelendiğinde P3 ve P6 akımlarının yaklaşık olarak birbirlerine eşit olduğu görülmektedir. Buradan yeni sistemdeki akım artışının ve birbirlerine göre akım farkının palplanjlardan ileri geldiği anlaşılmaktadır. Palplanjları bağımsız olarak incelemek gerekmektedir ki bu deniz kıyısındaki çamur ve suyu incelemek demektir. Bölüm 9.6.1’de deniz suyu ve çamuru geniş olarak incelenmiştir. Ancak akım artışındaki orantısızlık deniz çamurunun homojen olmadığını bir kere daha ortaya koymaktadır.

9.6.3. Eski katodik koruma sistemi ile yenisi arasındaki akımların incelenmesi

Bu bölümdeki incelemede eski katodik koruma sisteminden ölçülen ayak akımları ile yeni tesis edilen katodik koruma sisteminin ayak akımları karşılaştırılacaktır. Eski katodik koruma sisteminin akımlarını gösteren grafikler Şekil 7.5 ile 7.12 arasında gösterilmektedir. Eski sistemde P4 akımı P41 ve P42 ayaklarının toplamını, P5 akımı da P51 ve P52 ayaklarının toplamını kapsamaktadır.. Bu sebeple P41, P42, P51 ve P52 ayakları ile eski ölçmeleri karşılaştırabilmek için P4 ve P5 akımlarının yarısını göz önünde ölçmeleri bulundurmak gerekmektedir. Bunlar ortalama alınarak aşağıya çıkarılmıştır.

$$P3 \text{ Akımı} = 4 \text{ Amper}$$

$$P4 \text{ Akımı} = 15 \text{ Amper} / 2 = 7,5 \text{ Amper}$$

$$P5 \text{ Akımı} = 10 \text{ Amper} / 2 = 5 \text{ Amper}$$

Yeni kurulan katodik koruma sisteminden ölçülen akımlar da aşağıdadır.

$$P3 = 24 \text{ Amper}$$

$$P6 = 50 \text{ Amper}$$

$$P41 = 3 \text{ Amper}$$

$$P51 = 3 \text{ Amper}$$

$$P42 = 18 \text{ Amper}$$

$$P52 = 24 \text{ Amper}$$

Karşılaştırma yapılırsa,

$$3+18 = 21 > 15 \text{ A,}$$

$$3+24 = 27 > 10 \text{ A olduğu görülür.}$$

Bu değerler kullanılarak % artışı bulunabilir.

$$P4: 21/15 = 1,4 \text{ (%140) artış ve } P6: 29/10 = \%270 \text{ artış.}$$

Yorumlar

- 1972’de kurulan Haliç köprüsünün P4 ve P5 ayaklarında ve bu ayakların kazıklarında herhangi bir değişiklik olmamasına rağmen aynı kazıklar için yeni tesis edilen katodik koruma daha fazla akım vermektedir. Kazıkların yüzey alanı değişmediğine göre eski katodik koruma sisteminin daha az akım çekmesinin iki sebebi vardır. Birincisi, yeni katodik koruma sistemindeki anotların eski sisteme göre fazla sayıda ve homojen bir şekilde dağıtılmış olmasıdır. Homojen dağılım sayesinde uniform bir akım dağılımı sağlanmış böylece T/R ünitesinden çıkan akım homojen olarak çelik kazıkların tüm yüzeylerine nüfuz etmiştir. İkinci olarak, Haliç suyu ve çamurunun yapısı değişmiş ve daha kirli ve asidik bir ortama dönüştüğünden akım ihtiyacı da eskisine göre artmıştır.

9.6.4. Ayaklar arasındaki interferans akımının incelenmesi

Bu inceleme için P42 ayağı sabit olmak ve tüm ölçmeler bu ayaktan yapılmak üzere diğer ayakların T/R ünitesinin sırasıyla devre dışı bırakılmış ve her defasında P42’nin T/R ünitesinin akım ve gerilimleri ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçülen değerler Çizelge 9.9’dadır.

Çizelge 9.9 Ayaklar arasındaki interferans akım incelemesi

ÖLÇME AYAĞI	SAAT	AKTÜEL POTANSİYEL (V)	DC GERİLİM (V)	DC AKIM (A)	AÇIKLAMA
P42	12.25	1	2,6	4,7	Hepsi çalışıyor
P42	12.30	1	2,4	3,6	P4A kapalı
P42	12.35	0,99	2,4	3,6	P43,P4A kapalı
P42	12.40	1	2,4	4,7	P43,P4A,P4B
P42	12.45	0.95	2,4	3,3	P4’ler, P5A kapalı
P42	12.50	1	2,4	3,3	P4’ler, P5A,P52 kapalı
P42	12.55	0,98	2,4	3,5	P4’ler, P5A,P52,P53 kapalı
P42	13.00	0,99	2,4	3,6	P4’ler, P5’ler kapalı

Yorum

- T/R üniteleri teker teker kapatılmasına rağmen P42 T/R ünitesinin akımında herhangi bir artma olmamıştır. Çizelge 9.9’daki akım değişiklikleri normal akım değişikliğidir. Böylece ayaklar arasında akımın interferans etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

9.6.5. Kazık-zemin potansiyellerinin incelenmesi

Bu incelemede Şekil 9.7 (a) ile (j) arasındaki grafikler yorumlanarak kazık-zemin potansiyeli hakkında fikir yürütülecektir.

- 17.08.1998 tarihine gelene kadar T/R ünitelerinin tümünün akımları pozitif ve negatif yönde büyük zikzaklar yapmaktadır. Bunun sebebi o tarihlerde T/R ünitelerinin 220 V girişinin sağlıklı olmaması ve T/R istasyonlarının ayarlarının tümünün tamamlanmamasıdır. Bu sebeple grafiklerdeki değerlendirmelerde 17.08.1998 tarihinden sonraki ölçmeler değerlendirmeye tabi tutulacaktır.

- Kazık-zemin T/R ünitelerinin hepsinde 1 V değerine set edilmiştir. Genel olarak tüm grafiklerde kazık-zemin potansiyeli 1 V değerinin etrafında sabit kalmıştır. Potansiyelin sabit kalması için T/R üniteleri otomatik olarak kendini ayarlayarak çıkış akımını negatif veya pozitif yönde değiştirmektedir. Yani T/R üniteleri geri beslemeli ve otomatik olarak çalışmaktadır.

- 10 adet T/R ünitesinden 8 adedinin çıkış akımları zaman geçtikçe düşme eğilimi göstermekte, diğer ikisi sabit kalmaktadır. Buradan anlaşılmaktadır ki katodik koruma uygulandığı sürece eski köprüye ait ayakların kazıkları yenilerine göre daha az akım çekmektedir. Zaten eski köprüye ait ayakların yenilerine göre daha az akım çekmektedir. Bunun sebebi deniz suyu ve zemin içerisinde bulunan çelik kazıklarının zamanla pasifliğinin artmasıdır.

9.6.6. Paralel bağlı anotlarla tek anotlar arasındaki direnç incelemesi

Çizelge 9.3'de anodların hepsi sisteme bağlı iken (paralel) hesaplanan DC devre dirençleri, Çizelge 9.4'de ise anodların sisteme tek tek bağlı olması halinde hesaplanan DC devre dirençleri görülmektedir. Anodlar paralel bağlı iken toplam DC devre direnci tek tek anodların dirençlerinden daha düşüktür. Çünkü elektrik kanununa göre paralel bağlı dirençlerin toplam direnci tek tek dirençlerin en küçüğünden daha küçüktür.

9.6.7. Toplam anod akım-gerilimi ile tek tek anod akım-gerilimi arasındaki inceleme

Bu bölümdeki inceleme Çizelge 9.3 ve 9.4'deki ölçme sonuçları kullanılacaktır. İncelemenin amacı, ayakların etrafındaki anotların tümü sisteme bağlı iken ölçülen akım-gerilim değerleri ile aynı ayaktaki anotların tek tek sisteme bağlı olduğu andaki akım-gerilimlerini karşılaştırılmasıdır. Karşılaştırmalar sonucunda aşağıdaki yorumlamalar yapıldı.

Yorumlar

- Anodlar tek tek sisteme bağlandığı zaman ölçülen akım ve gerilim tüm anodların bağlı olduğu esnada ölçülen akım ve gerilimden her zaman yüksek bulunmaktadır. Ancak eski ve yeni kazıklardaki artış oranları farklıdır. Yeni kazıklarda, ölçülen tek anod akımları paralel bağlı anodlarda ölçülen akımdan daima yüksektir. Halbuki eski kazıklarda akım biraz yükselmesine rağmen tek anod akımları toplam anodlarda ölçülen akımı aşamamaktadır.
- Sisteme tek tek anodlar bağlı iken akımın artışının iki sebebi olabilir. Birincisi, devrede olan anod devre dışı bırakılan anodların akım yükünün bir miktarını kendi üzerine almaktadır diye düşünülebilir. Ancak T/R ünitelerinin çalışma prensibi incelendiğinde bunun yanlış olduğu anlaşılmıştır. İkinci olarak, devre dışı bırakılan anodların etrafındaki potansiyel birden düştüğünden referans elektrod bu düşüşü algılamaktadır ve T/R ünitesine gerilimi dolayısıyla akımı arttırma yönünde çalışmaktadır. Devre dışı bırakılan referans elektrodun bulunduğu bölgedeki kazık zemin potansiyeli 1 V olduğunda akım artışı kesilmektedir.
- Yeni kazıklarda gerilim ve akım artışının yüksek olması eski ve yeni kazıkların polarizasyon ve depolarizasyonlarının birbirinden farklı olmasındandır. Yeni kazıklarda kazık-zemin potansiyeli düşüşü daha hızlı olmakta ve bu yüzden kazıkların gerilim ve akımı daha fazla artmaktadır.
- T/R ünitelerinin çıkış geriliminin her redresörde farklı şekilde değişmesi deniz suyu ve çamurunun heterojen bir yapıdan olmasından kaynaklanmaktadır.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Haliç köprüsünün çelik kazıklarının elektrokimyasal korozyonun etüd edilmesinin ve korozyonun bilgisayar kontrollü dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi kullanılarak önlenmesinin incelendiği bu çalışma ile yapılan yenilikler ve elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. “Haliç köprüsünün çelik kazıklarının bilgisayarlı uzaktan kontrollu katodik koruma sistemi” ülkemizde bu alanda yapılan ve devreye sokulan ilk projedir. Bu projenin bilgisayar kontrolu ve buna uygun trafo-redresör (T/R) ünitelerinin imalatı ana başlıkları altında toplanabilecek “ilk olma özellikleri” söz konusudur. Adı geçen koruma sisteminin devreye girdiği andan itibaren gözlenmesi, çıktıların değerlendirilmesi ve yorumlanması, hata analizi sürekli olarak yapılmıştır. Özet olarak, Türkiye’de ilk kez bu çalışma ile yeni bir katodik koruma sistemi kurulmuş ve kurulan sistemin işletilmesi, bu çalışma ile ayrıntılı olarak incelenmiş bulunmaktadır.
2. Adı geçen katodik koruma sisteminin projelendirilmesi aşamasında ve sonradan işletilmesi sırasında yapılacak yorumlarda büyük önemi olan Haliç ortamının gerek jeolojik, gerekse kimyasal özellikleri topluca ortaya konulmuştur.
3. Haliç köprüsünün önceki (1972 ile 1993 arasında işletmede kalan) klasik katodik koruma sistemi, yeni sistemin projelendirilmesi aşamasında akım ihtiyacı gibi bilgilerin sağlanması bakımından yararlı olmuştur.
4. Söz konusu ön bilgiler (17 yıl boyunca aralıklarla alınan ölçüm sonuçları) bir araya getirilerek, yeni sistem ile eski sistemin çalışma karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Eski sistemde köprünün ortasında az sayıda elektrotla (anotla) yapılan koruma sonucu fazla akım çekilememiş ve dolayısıyla verimli bir koruma yapılamamıştır. Yeni sistemde ise, çok sayıda elektrotla (anotla) üniform bir akım dağılımı sağlandığından çekilen akımın da homojen olarak çelik kazıkların tüm yüzeylerini etkilediği gözlenmiştir.
5. Köprü ayakları civarında “derinkuyu anot” ile “sığ anot” yataklarının çektikleri akımlar karşılaştırıldığında, derinkuyu anodun daha fazla akım çektiği görülmektedir. Bu durum, derinkuyu tipile tesis edilen anotların zemine dik olarak çakılan çelik kazıkların yüzeyine daha çok nüfuz ettiği şeklinde yorumlanmıştır.

6. Haliç köprüsünün katodik koruması ile ilgili tüm parametreler (rezistivite, pH değeri, çözünmüş oksijen, sıcaklık, ORP (oksidasyon-redüksiyon potansiyeli), toplam çözünmüş katı madde miktarı, tuzluluk oranı) birleştirilerek ortaya konulmuştur; böylelikle bilgisayardan alınacak çıktıların ortam koşullarına bağlı olarak yorumlanması mümkün olacaktır. (Şekil 6.10 - Şekil 6.20 ve Çizelge 6.11 - Çizelge 6.16)
7. Haliç ortamının korozyon derecesi 1972, 1996 ve 1997 yıllarındaki ölçümler çerçevesinde her yönüyle irdelenmiştir. Sonuç olarak Haliç ortamının özellikle ilk 8 metrelik kısmının “çok korozyon olduğu ortaya konulmuştur. (Bölüm 6.5.2)
8. Katodik korumada akım ihtiyacının tayini literatür ve ölçme bilgileri yardımıyla karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. (Bölüm 7.3.1.2) Eski (klasik) katodik korumada sistemindeki akım ölçüm değerlerinden hareketle, “ayaklar”ın akımlarının zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. (Şekil 7.5 - Şekil 7.12) Bu değişimler, eşzaman dilimleri için yapılacak analizlerde ve akım ihtiyacının belirlenmesinde yol gösterici olacaktır.
9. Projelendirmedeki akım yoğunluğu ile ölçüm sonucu belirlenen akım yoğunluğu arasındaki farklılıklar yorumlanmış ve “% sapma değerleri” hesaplanmıştır.
10. Bilgisayar kontrollü (yeni) katodik koruma sisteminin ekonomik analizi yapılmış, maliyet bileşenleri topluca ortaya konulmuştur. Elektrik enerjisi tarifi (TL/kWh) ile paranın değeri için öngörülen senaryolar çerçevesinde, yıl sürecinde, katodik koruma sisteminin maliyeti elde edilmiştir. (Bölüm 7.10)
11. Katodik korumada akım ihtiyacına etki eden ortamın özgül direncinin formülasyonu verilmiştir. (Bölüm 6.4)
12. Haliç köprüsünün önceki klasik katodik koruma sisteminin projelendirilmesinde hesaplanan akım değerleri ile 1972-1989 arasındaki akım ölçümleri arasındaki fark yorumlanarak Haliç çalışma sahası zeminin literatürde tanımlanan standart zemin ve deniz suyu tanımlarıyla benzerlik göstermediği izah edilmiştir.

13. Projelendirilmede, literatürde verilen akım yoğunluğu miktarları daha düşük alınarak akım ihtiyacının düşük çıkması sağlanmıştır. Böylelikle anot sayıları gereksiz yere arttırılmayacak böylece ilk tesis maliyeti azalacaktır. Tesis işletmeye alındıktan sonra gerçek akım değerleri ölçülerek şayet gerekiyorsa anot ilave edilecektir. Ancak bunun için daha sonra ilave güç ihtiyacı olabileceği düşünülerek T/R ünitelerinin gücü biraz fazla seçilmelidir. Bu durum maliyeti fazla arttıran bir unsur değildir. Bunların doğruluğu Bölüm 7'de uygulanarak tesbit edilmiş ve ilave anot kullanılmasına gerek kalmamıştır.
14. Ag/AgCl referans elektrodunun, tesis edildiği Haliç çamuru içerisindeki oksijen miktarındaki farklılıktan dolayı zamanla yüzeydeki aynı tip referans elektroduna göre potansiyelinin değiştiği Bölüm 9'daki testler esnasında ortaya konulmuştur. Bu sebeple Haliç ortamı gibi çamurlu bölgelerde referans elektrodun yüzeye ve çelik kazığa yakın, potansiyelinin zamanla değişmeyeceği düşünülen bol oksijenli yere konulması gerekecektir, sonucu çıkmıştır.
15. Haliç ortamı gibi çamurlu ortamlarda referans elektrodlardan elde edilen potansiyelin bilgisayarlı sistemde doğru olarak kullanılabilmesi için otomatik geri besleme sistemi çevrimindeki referans elektrod, zaman zaman seyyar referans elektrotla karşılaştırılmalı ve sistem kalibre edilmelidir. Bölüm 9'da bu sonuca varılmıştır.
16. Katodik koruma sistemine bağlı olan anotların tümünün yüksek güçlü bir adet T/R ünitesi yerine daha düşük güçlü birkaç T/R ünitesi ile enerjilendirilmesi sayesinde anotların ve bağlı sistemlerin iç dirençlerinin ortalama olarak eşitleneceği dolayısıyla akım dağılımının homojen olacağı anlaşılmıştır. Bir yerine birkaç T/R ünitesi kullanıldığında herhangi bir T/R ünitesinde arıza oluşması halinde tesisin tamamıyla devre dışı kalması da engellenmektedir.
17. Bölüm 8'da T/R ünitesinin DC çıkış voltajındaki dalgalanmanın (ripple) katodik koruma sisteminde etkisi olmayacağı, sadece platin kaplamalı anotlarda zararlı etkilerinin olduğu sonucuna varılmıştır. Haliç köprüsü katodik koruma sisteminde kullanılan karma oksit kaplı titanyum anot T/R ünitesinin dalgalanmasından (ripple) etkilenmeyeceği, dolayısıyla bu tip anot ve T/R ünitesinin uyumlu çalışacağı ortaya konulmuştur.

18. Klasik katodik koruma sisteminin bilgisayar kontrollü sistem ile değiştirilmesi ile telefon hatlarının (telli veya telsiz) bulunduğu her yerden katodik koruma sistemine müdahale edilebileceği, koruma potansiyellerinin okunabileceği, böylece sistemde gerekli değişikliklerin yapılabilme olanağı imkanı oluşmuştur (Bölüm 8).
19. Bilgisayarlı kontrol ünitesi otomatik T/R üniteleri sayesinde Haliç Köprüsünün önceki katodik koruma sisteminde aylık veya 2 aylık periyotlarla yapılan kazık/zemin potansiyeli kontrolleri her yarım saatte bir yapılır hale gelmiştir (Bölüm 8). Bu durum elektrik sarfiyatını ve diğer işletme maliyetlerini azaltmaktadır.
20. Bilgisayardan her yarım saatte bir elde edilen kazık/zemin potansiyelleri ile meteorolojik koşulların bu sistem sayesinde beraberce karşılaştırılarak değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu bilgiler aynı konu üzerinde yapılacak bundan sonraki çalışmalara kaynak teşkil edecektir.
21. Ayvansaray-Halıcioğlu eksenindeki ayakların akımları incelenerek Ayvansaray kıyısına yakın olan bölgelerdeki ayakların Halıcioğlu kıyısına yakın olan ayaklara göre daha fazla akım çektiği tespit edilmiştir. Kazık yüzey alanı vb. gibi tüm proje koşullarının eşit olması halinde bile Ayvansaray kıyısına yakın olan kazıkların Halıcioğlu kıyısına yakın olan kazıklardan %27 daha fazla akım çekeceği hesaplanmıştır. Bu oran Haliç bölgesinde bundan sonra yapılacak herhangi bir katodik koruma projesinde kullanılabilecektir.
22. Halıcioğlu kıyısına yakın olan bölgelerde kazıkların daha az akım çekmesinin sebebi bu kesimdeki deniz suyu ve çamurunun rezistivitesinin yüksek, iletkenliğinin ise düşük olmasındadır. Kuzeyde Haliç girişinde bulunan Kağıthane ve Alibey derelerinden gelen tatlı suların Haliç'in kuzey yönü olan Halıcioğlu kıyısı yakınlarındaki bölgenin iletkenliğinin düşmesinin nedeni olduğu Bölüm 9.6.1'de ortaya konulmuştur.
23. Eski Haliç köprüsü ile Yeni Haliç köprüsü kazıklarının çektikleri akımlar karşılaştırılarak Eski Haliç Köprüsü çelik kazıklarının projelendirme akımına nazaran çok düşük akımlar çektiği tespit edilmiştir. Buna göre uzun süre deniz suyu veya zemin içerisinde kalan kazıkların yeni çakılan kazılara göre çok daha az akım çekeceği sonucu

çıkarılmıştır. İncelemenin yapıldığı Bölüm 9.6.1'de bu olaya eski kazıkların pasifliğinin yenilere göre daha yüksek olmasının sebep olduğu ortaya konulmuştur.

24. Bölüm 9.6.1'deki incelemeler neticesinde her ayak grubunun orantısız olarak birbirlerinden farklı akım çektiği tespit edilmiş ve böylece Haliç deniz suyu ve çamurunun homojen olmayan yani heterojen bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. Jeoteknik incelemeler neticesinde bulunan dikey heterojenliğin yatayda da söz konusu olduğu sonucu çıkarılmıştır. Yataydaki heterojenlik Bölüm 9.6.2'de tekrar teyit edilmiştir.
25. Bölüm 10.6.4'de ayaklar arasındaki interferans akımlarının incelemesi yapılarak ayakların birbirlerini etkilemedikleri ortaya konulmuştur.
26. Anodların paralel bağlanması halinde dirençlerinin azalacağı deney yapılarak tespit edilmiştir.
27. Ayaklarda anodların toplu olarak bağlanması ile tek tek bağlanması halindeki akım-gerilim ölçmeleri yapılarak ve bu ölçmeler eski ve yeni kazıklar olarak gruplandırılarak eski ve yeni kazıkların polarizasyon ve depolarizasyonlarının farklı olduğu sonucu çıkarılmıştır. Yeni kazıklardaki akım kesildiğinde kazık-zemin potansiyelinin eski kazıklara göre daha hızlı düşüş gösterdiği ortaya konulmuştur.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler ışığında, çelik kazıkların bu tip bilgisayar kontrollü katodik korunması kapsamında öngörülecek yeni projelerde aşağıdaki noktaların dikkate alınması önerilebilir:

1. Haliç köprüsünün katodik korunması için ön bilgiler, ölçüm değerleri ve işletme deneyimi yaklaşık 20 yıllık bir birikime sahip idi ve yeni projede önemli ölçüde katkısı olmuştur. Daha önce katodik koruma sistemi bulunmayan bir tesiste (örneğin bir köprüde) katodik koruma için jeolojik ve elektrokimyasal etütlerin yanısıra zemin özelliklerinin analizi de ayrı bir önem taşımaktadır. Bu çerçevede, ilgili zeminin çevre parametreleri eşliğinde alınacak çok sayıda deney/test bilgisi maksimum akım ihtiyacının sağlıklı olarak belirlenmesini sağlayacaktır. Çok sayıda ve farklı zaman dilimine ait ölçümler yardımıyla yıl bazında durum kestirimi yapılabilir. Bu konuda kullanılacak simulasyon teknikleri arasında “Yapay Sinir Ağları (YSA)” sayılabilir.

2. Katodik koruma projesi yapılacak olan köprünün uzunluğu ve genişliği, özellikle trafik yoğunluğu dikkate alınarak katodik koruma bilgisayar kontrol merkezi birden fazla sayıda öngörülebilir.
3. Katodik koruma projesi yapılacak olan köprünün katodik korumasında elektrik kesintisinden kaynaklanan boşluklar olmamalıdır. Köprünün önemi ve özellikleri de dikkate alınarak;
 - Elektrik kesintilerinde otomatik olarak devreye giren yedek güç kaynağı (kaynakları)
 - Şebeke gerilimlerindeki aşırı salınımları T/R ünitelerinin tolerans sınırları içine çekecek regülasyon devreleri projede dikkate alınmalıdır.
4. Tasarlanacak projede köprünün çelik ayaklarının kara parçasında kalan bölümleri için “katodik koruma-zemin analizi” yapılırken;
 - Toprağın yapısı, mevsimlik karakteristik değişimler
 - Toprağın üniform yada non-üniform olduğunun noktasal jeolojik etütlerle ortaya konulması
 - İnşaat tekniği bakımından tercih edilen sert zeminlerin rezistivite yönünden de analiz edilmesi gibi noktalar gözden uzak tutulmamalıdır.
5. Deniz suyunun günlük veya mevsimlik akıntı hızı, mevsimlik kirlilik oranları, mevsimlik elektrokimyasal özellikleri ilgili Çevre, Meteoroloji ve Oşinografi Dairelerinin kayıt ve istatistiksel bilgilerinden yararlanılmalıdır. Çok sayıdaki sağlıklı bilgi sonucu “gerçek akım” ihtiyacı bulunacak ve koruma sisteminde fazla anot kullanımına gerek olmadan minimum maliyet gerçekleşmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ashworth, V. ve Googon, C., (1993) Cathodic Protection Theory and Practice, Ellis Horwood Pub.
- Atkinson, J.T.N. ve Draffelaar, H.V., (1995), Korozyon ve Korozyon Kontrolü (Çev., H. Yalçın. ve T.Koç), (baskıda), Ankara.
- Atkinson, J.T.N. ve Droffelaar H.V., (1982), Corrosion and It's Control, NACE, Houston."
- BAC, Bergsoe Anti Corrosion, (1996), Haliç Deniz Suyunun Etüd Çalışma Raporu, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul.
- Baeckman, W. (1983) Pipeline Engineering, Taschenbuch für den Kathodischen Korrosionsschutz, Vulkan-Verlag-Essen.
- Blaricum, V.V. ve Kumar, A., (1992), "Computerized Monitoring of Cathodic Protection Systems for Underground Structures", MP, September 1992.
- British Standart, (1991), Cathodic Protection BS 7361 Part-I.
- Broomfield, J.P., (1992), "Strategic Highway Research Program", MP, Semtember 1992.
- Croall, S., (1997), "Cathodic Protection Remote Monitoring for a Gas Distribution System", NACE Canadion Region Western Conference, Feb. 3-6 1997, Edmonta, Alberta.
- Çakır, A.F., (1990), Metalik Korozyon İlkeleri ve Kontrolü, Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- Çizmecioğlu, Z., (1997), "Valide Sultan Köprüsü Taşıyıcı Dubalarının Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma Sistemine ait Ölçümlerin İncelenmesi", Tekder Yayın Organı Sayı: 14, İstanbul.
- Çizmecioğlu, Z., (1998), İsale Hatlarının Katodik Koruması, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSKİ İdaresi, İstanbul.
- Dabkowshi, J., (1995), "Pulsed Rectifier Limitation for Well Casing Cathodic Protection", MP, October 1995.
- Daley, J.D. ve Ingraham, D., (1996), "Underwater Maintanance Inspection of CP Systems", MP, 1996.
- Dolan, M.P., (1993), "A Simple System for Remote Monitoring of Cathodic Rectifiers", MP, May 1993.
- Doruk, M., (1983), "Korozyonun Temel İlkeleri Üzerine" Korozyon Sempozyumu, Ankara
- Doruk, M., (1982), "Korozyon ve Önlenmesi, ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:

70, Ankara.

EMO, (1995), Teknik Ajanda, Elektrik Mühendisleri Odası, Ankara.

Gartland, P.O., Strommen, R. ve Bardal, E., (1983), "Current Density Requirements for Cathodic Protection of Steel Structures In the North Sea", MP, June 1983.

Gartland, P.O., Strommen, R.D., Oswoll, H. ve Johnsen, R., (1993), "Offshore Cathodic Protection Design, Inspection and Computer Modeling", MP, December 1993.

Gehring, G.A., (1987), "Seawater Corrosion", MP, September 1987.

Green, M.M., (1983), "Cathodic Protection Design", A.F. Manual 88-45, Washington.

Husock, P.E.B., "Rectifier Units for Cathodic Protection, The Harco Corporation Paper No: EP-2, 66-825, Japan.

Jones, D.A., (1991), Principles and Prevention of Corrosion, MacMillan Publishing Company, New York.

La Que, F.L., (1975), Marine Corrosion Causes and Prevention, John Wiley and Sons, New York.

Millan, G.M., (1993), "Developments In Cathodic Protection Rectifiers-Part2-", MP, December 1993.

Millan, G.M., (1993), "Developments in Cathodic Protection Rectifiers-Part1-", MP, November 1993.

Mollan, R. ve Aliassen, S., (1984), "Design Criteria Examined for Cathodic Protection", Technology Oil and Gas Journal, 1984.

Morgan, J.H., (1985), Cathodic Protection, NACE, Houston.

Parker, M.E., (1967), Pipeline Corrosion and Cathodic Protection, NACE, Houston.

Parker, M.E., (1980), "Corrosion By Soils" NACE Basic Corrosion Course, Chapter-6

Peterson, M.H., (1959), "Principles and Criteria for Cathodic Protection", Corrosion Dergisi, 1959.

Reding, J.T., Mudd, C.J., Mussinelli, G.L. ve Tettamanti, M., (1990) "Computer-Aided Design of Impressed Current Cathodic Protection Groundbeds", MP, October 1990.

Rizzo, M.E. and Wildman, I.A., (1997), "Computerized Cathodic Protection Technology Reduces Pipeline Reconditioning Costs", MP, October 1997.

Robinson, R.C., (1993), "Computerized Corrosion Monitoring for Metallic Pipeline

Structures", MP, April 1993

Rosenqvist, I.T., (1961), Subsoil Corrosions of Steel, Norveç Geotknik Enstitüsü Yayını, Yayın No:42, Norveç.

Schrieber, C.F. ve Mussinelli, G.L., (1987), "Charactaristics and Performance of the LIDA Impressed Current System in Natural Waters Saline Muds", MP, 1987.

Shepard, E.R. ve Graeser, J., (1950), "Design of Anode Systems for Cathodic Protection of Underground and Water Submerged Metallic Structures", NACE Sixth Annual Conference, April 1950, USA.

Shreir, L.L., (1977), Corrosion Vol.-1 ve Vol.-2, Newnes Butterwords

Smith, S.N., (1993), "Analysis of Cathodic Protection on an Underprotected Offshore Pipeline", MP, April 1993.

Speller, F.N., (1951), Corrosion Causes and Prevention, John Wiley and Sons, Newyork.

TCK, (1970), Report of Soil Exploration of İstanbul Haliç Bridge, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul

TCK, (1972), "Cathodic Protection Arrangement for Steel Pipe Piles of Haliç Bridge, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul.

TCK, (1972), Technical Specification for Cathodic Protection System for Steel Piles of Golden Horn Bridge, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul."

TCK, (1973), Haliç Köprüsünün Çelik Boru Kazıkları İçin Katodik Koruma Tertibi, Karayolları 17.Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul.

TCK, (1973), Maintenance Specification for Cathodic Protection System of Steel Pipe Piles of Golden Horn Bridge, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul.

TCK, (1992), New Galata Bridge Cathodic Protection System, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul.

TCK, (1994), Haliç A ve B Köprülerinin Nihai Geoteknik Raporu, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul.

TCK, (1996), Haliç Bölgesi Zemin ve Deniz Suyunun Etüd Çalışma Raporu, Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü Proje Dökümanları, İstanbul)

Technical Innovation of Corrosion Control for Undenground Pipelines, Nakabahtec Corrosion Protecting Co., Ltd. Technical Bulletin 218-E, Japan.

Tefankjian, D.A., (1970), "Application of Cathodic Protection.", Proc. Üniv. Oklahoma Corrosion Control Course, Sept. 1970, Norman, Okla.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 10.01.1966

Doğum yeri İstanbul

Lise 1980-1983 Maçka End.Mes.Lisesi

Lisans 1983-1988 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1989-1991 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı

Doktora 1992-1998 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1983-1983 ITT

1984-1985 Bilsan Zaman Sistemleri

1986-Devam T.C.Karayolları 17.Bölge Müdürlüğü