

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİÜRETAN KAPLI ÇELİK BORULARIN
KATODİK KORUMASI

EROL DAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
(KİM. MÜH. ANABİLİM DALI)

1997
ANKARA

Erol DAĞ tarafından hazırlanan POLİÜRETAN KAPLI ÇELİK BORULARIN KATODİK KORUMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Doç. Dr. Vecihi PAMUK

Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hayri YALÇIN



Üye : Doç. Dr. Vecihi PAMUK



Üye : Prof. Dr. Abbas AKSÜT



Üye :

Bu tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



POLİÜRETAN KAPLI ÇELİK BORULARIN KATODİK KORUMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Erol DAĞ
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mart 1997

ÖZET

Bu çalışmada amaç, ısı yalıtımı için kullanılan poliüretan kaplamalı boruların akım ihtiyacının laboratuvarda, prototip ve büyük boru hatlarında tesbit etmek ve literatür için veri oluşturmaktır. Laboratuvar ve prototip model deneylerinde AFJET tarafından Afyon Şehrinin Jeotermal enerji ile ısıtılması için kullanılan poliüretan kaplı gerçek boyutta çelik borular kullanılmıştır. Akım ihtiyacı deneylerinde polarizasyon kayması yöntemleri uygulanmıştır. Uygulamada, poliüretan kaplı ısı yalıtımlı çelik boru yanında, dönüş suyunu taşıyan bitüm kaplı aynı çaplı başka bir çelik boru daha bulunmaktadır. Alınan verilerde bu iki boru arasındaki interferans olayları da araştırılmıştır. Sonuçta, laboratuvar tipi çalışmalar, prototip model çalışmalar ve uygulama değerleri mukayese edilmiştir.

Bilim Kodu :602.03.02

Anahtar Kelimeler :Korozyon, Katodik Koruma, Poliüretan Kaplama,
Katodik Koruma Akım İhtiyacı

Sayfa :100

Tez Yöneticisi :Doç.Dr.Vecihi PAMUK

CATHODE PROTECTION OF THE STEEL PIPES THAT COVERED
WITH POLYURETHANE

(M. Sc. Thesis)

Erol DAĞ

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

March 1997

ABSTRACT

The aim in this study is, determination of the current neediness of the polyurethane covered pipes in laboratory environment, prototype pipes and large pipe lines with data acquisition for literature. For laboratory environments and prototype model experiments the polyurethane covered steel pipes with reel dimensions have used in Afyon City geothermal energy heating system that was established by AFJET Co. In this application polarization shift methods was used in experiments for determination of current neediness. In this application there is a temperature isolated polyurethane covered steel pipe and another steel pipe that is covered with bitum for returned geothermal water. Also a research has been done about the interference effects of this pipes to each other.

At result, content of laboratory environment studies, prototype model studies and practical quantities have been compared.

Science Code : 602.03.02

Key Words : Corrosion, Cathodic, Polyurethane Cover, The neediness of cathodic Protection current.

Pages : 100

Adviser : Doç.Dr.Vecihi PAMUK

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında, büyük ilgi ve desteğini gördüğüm, ileri görüşlü ve yol gösterici yaklaşımlarıyla yardımlarını esirgemeyen değerli hocam, Sayın Doç. Dr. Vecihi PAMUK Beye en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalar sırasında maddi-manevi emeğin geçen bütün hocalarıma, dönem arkadaşlarıma ve mesai arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Kullandığım malzeme ve cihazların temininde yardımlarından dolayı hocam, Sayın Doç. Dr. Timur KOÇ Beye ayrıca teşekkürlerimi arz ederim.

Bilimsel çalışmalarım sırasında sonsuz şefkat ve sevgilerini esirgemeyen sevgili anne ve babama, çok değerli kardeşlerime, her zaman varlığını yanımda hissettiğim şu anda Amerika'da bulunan çok değerli arkadaşım Vehbi Aytekin Sanalan'a, tüm dost ve arkadaşlarıma sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Konu ve Amaç.....	1
2.LİTERATÜRDE YER ALAN ÇALIŞMALAR.....	3
3.KOROZYON VE KOROZYONDAN KORUNMA.....	13
3.1.Korozyon.....	13
3.1.1.Korozyonun Önemi.....	13
3.2.Korozyonun Elektrokimyasal İlkeleri.....	14
3.2.1.Hidrojen çıkışı yoluyla yürüyen katot reaksiyonu.....	15
3.2.2.Oksijen indirgenmesi yoluyla yürüyen katot reaksiyonu.....	16
3.2.3.Polarizasyon.....	17
3.2.4.Anodik ve katodik polarizasyon.....	19
3.3.Yeraltı Korozyonu.....	20
3.3.1.Galvanik korozyon.....	21
3.3.2.Kaplama bozukluğu nedeniyle oluşan korozyon.....	21
3.4.Korozyondan Korunma.....	21
3.4.1.Boru yüzeylerinin uygun bir malzeme ile kaplanması ve kaplama tipleri.....	22
3.4.1.1.Sıcak tatbikli bitüm kaplamalar.....	22
3.4.1.2.Soğuk tatbikli bitüm kaplamalar.....	23
3.4.1.3.Epoksi tipi kaplamalar.....	23

3.4.1.4.Bant sargılar ve plastik kaplamalar.....	23
3.4.1.5.Beton kaplamalar.....	24
3.4.1.6.Poliüretan kaplamalar	24
3.5.Akım İhtiyacı ve Kaplama Direnci Tayini Deney Yöntemleri.....	25
3.5.1.Boru-zemin potansiyeli değişimi ve akım ihtiyacı.....	27
3.5.2.Sonsuz uzunlukta bir boru hattının korunması.....	28
3.6.Polarizasyon - Kırılma (Tafel Ekstrapolasyon) yöntemi.....	31
3.7.Kaplama Direncine Göre Akım İhtiyacı Tesbiti.....	34
3.8.Katodik Koruma.....	36
3.8.1.Dış akım kaynaklı katodik koruma.....	37
3.8.2.Galvanik anotlu katodik koruma sistemi.....	37
3.8.3.Akım ihtiyacı.....	38
4.MATERYAL VE METOT.....	39
4.1.Laboratuvar Çalışması.....	39
4.1.1.Deney malzemeleri.....	39
4.1.2.Deney sistemi.....	40
4.1.3.Deneyin yapılışı.....	42
4.1.4.Deney verileri.....	42
4.1.4.1.Akım potansiyel değerleri.....	42
4.1.4.2.Kaplama direnci tayini deneyleri.....	44
4.2.Arazi Prototip Deneyleri.....	45
4.2.1.Deney malzemeleri.....	45
4.2.2.Zemin.....	46
4.2.3.Deney sistemi.....	46
4.2.4.Deneyin yapılışı.....	48
4.2.5.Akım potansiyel değerleri.....	49
4.3.Arazi (Uygulama) Deneyleri.....	50
4.3.1.Zemin özellikleri.....	50

4.3.2.Boru ve kaplama özellikleri.....	52
4.3.3.Uygulama özellikleri.....	53
4.3.4.Uygulama değerleri.....	53
5.DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	63
5.1.Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	63
5.1.1.Laboratuvar çalışması sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi.....	63
5.1.2.Prototip model çalışması sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi.....	66
5.1.3.Uygulama deneyleri sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi..	69
5.1.4.Akım ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması.....	86
6.SONUÇ.....	87
EKLER.....	90
EK-1 Wenner dört nokta yöntemi ile zemin rezistivitesi ölçümleri.....	90
EK-2 Boru akım ihtiyacının kaplama direnci yolu hesaplanması.....	92
KAYNAKLAR.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. Korozyon hücresinin tipik polarizasyon grafiği (Gummow, 1986).....	5
Şekil 2. E log I Tafel eğrisi.....	6
Şekil 3. Katodik koruma sistem dizaynı.....	10
Şekil 4. İyi ve kötü kaplanmış boru hatları boyunca potansiyel değişim.....	11
Şekil 5. Bir korozyon hücresinde anot ve katot polarizasyonu.....	18
Şekil 6. Değişik polarizasyon kontrollü korozyon hücreleri.....	19
Şekil 7. Bir korozyon hücresi içindeki anodik ve katodik polarizasyon gösteren eğri (Çakır, 1990) (EVANS)	20
Şekil 8. Kaplama direncinin deneysel olarak tayini.....	26
Şekil 9. Bir boru hattında akım ve potansiyel değişimi.....	27
Şekil 10. Polarizasyon kırılma yöntemine göre akım ihtiyacı deney düzeneği.....	32
Şekil 11. Oksijensiz bir elektrolite daldırılan bir metalin katodik polarizasyon eğrisi.....	33
Şekil 12. Boru kaplama direncinin tayini deneyi devre şeması.....	34
Şekil 13. Boru üzerinden geçen akımın sıfır iç dirençli ampermetre ile ölçülmesi.....	35
Şekil 14. Polarizasyon kırılma yönetimi için şematik deney düzeneği.....	41
Şekil 15. Polarizasyon kırılma yöntemine göre arazide prototip boyutta kurulmuş olan deney düzeneği.....	47
Şekil 16. Laboratuvarında yapılan polarizasyon kırılma deney sonuçlarının Potansiyel-Log (i) grafiği.....	65
Şekil 17. Arazide yapılan polarizasyon kırılma deney sonuçlarının Potansiyel-Log (i) grafiği.....	68

Şekil 18.	1. Ayda katodik koruma sistemi devrede değilken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği	72
Şekil 19.	2. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	73
Şekil 20.	3. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	74
Şekil 21.	4. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	75
Şekil 22.	5. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	76
Şekil 23.	6. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	77
Şekil 24.	7. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	78
Şekil 25.	8. ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	79
Şekil 26.	8. ayda katodik koruma sistemi devre dışı iken alınmış boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.....	80
Şekil 27.	Bütün ölçümlerin genel grafiği.....	81
Şekil 28.	Boru hattında zamanla oluşan polarizasyon kayma potansiyelleri değişimi.....	84
Şekil 29.	Wenner 4 nokta ölçüm detayı.....	94

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1. Sıcak tatbikli Bitüm kaplama cins ve kalınlıkları (TS-4356).....	23
Tablo 2. 1 metre çapında ve 1 km uzunluğundaki kaplamalı bir çelik borunun 1.000 Ohm. cm rezistiviteli bir zemin içindeki akım ihtiyacı (Baeckmann, 1973).....	25
Tablo 3. Farklı galvanik anotları akım kapasiteleri.....	38
Tablo 4. Akım-Potansiyel değerleri (Cu/CuSO ₄ Ref.Elek.göre).....	43
Tablo 5. Kaplama direnci için E _{on} ve E _{off} Eölçümleri (I=0,65 mA).....	44
Tablo 6. Akım potansiyel verileri.....	49
Tablo 7. Boru hattı zemininin rezistivite değerleri.....	51
Tablo 8. Boruların fiziksel özellikleri.....	52
Tablo 9. Boru hattına katodik koruma uygulanmadan önceki doğal boru/zemin potansiyelleri.....	54
Tablo 10. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri.....	55
Tablo 11. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri.....	56
Tablo 12. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri	57
Tablo 13. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri.....	58
Tablo 14. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri.....	59
Tablo 15. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri.....	60

Tablo 16.	Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri.....	61
Tablo 17.	Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan ölçümler boru/zemin potansiyelleri.....	62
Tablo 18.	Polarizasyon kırılma yöntemi için laboratuvar da yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.....	64
Tablo 19.	Polarizasyon kırılma yöntemi için arazide yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.....	67
Tablo 20.	Uygulama deneylerinde elde edilen boru/zemin potansiyeli değerleri.....	70
Tablo 21.	Boru boyunca polarizasyon kayması değerleri için değerlendirilen ölçümler	83
Tablo 22.	Boru boyunca polarizasyon kayması için değerlendirilen ölçümler ve polarizasyon kayma değerleri.....	83
Tablo 23.	Boru boyunca polarizasyon kayması değerleri.....	85
Tablo 24.	Akım ihtiyacı değerleri.....	86

1. GİRİŞ

1.1 Konu ve Amaç

Metallerin elektrolit ortamlardaki korozyonunu önlemek için , kaplama yapılmakta ve katodik koruma uygulanmaktadır. Kaplama korozyonu azaltan bir etkiye sahiptir. Katodik koruma ise korozyonu önleyen bir yöntemdir.

Katodik koruma biri dış akım kaynaklı diğeri ise galvanik anotlu olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Korunacak yapının bulunduğu zemine, boru hattının fiziksel büyüklüğüne ve dolayısıyla koruma akım ihtiyacına , montaj kolaylığına, işletme kolaylığına göre bu iki sistemden biri uygulanır.

Çalışma konusu boru hattı birbirine paralel biri poliüretan kaplı diğeri bitüm kaplı iki boru hattından oluşmaktadır. Borular 400 mm çapında ve 14 km boyundadır. Katodik Koruma sistemi tasarlanırken, poliüretan kaplı boru ile bitüm kaplı boru arasında kaplamaların farklılığından ileri gelen bir potansiyel farkının olduğu ölçülmüştür. Bundan dolayı , sahada 50 metrelik poliüretan kaplı borunun en düşük dirençli ortamda polarizasyon kırılma yöntemi ile akım ihtiyacı testleri yapılmıştır.(Poliüretan kaplı borular için literatürde akım ihtiyacı değeri yoktur.)

Bütün bu çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara varılması hedeflenmiştir,

1. Poli üretan kaplı çelik boruların katodik koruma kriterlerinin elde edilmesi
2. Sistemin bir gereği olarak kullanılan poliüretan kaplı ve bitüm kaplı yanyana giden ve birbirine interferans etkisi gözlenen boruların katodik korumasının yapılması,
3. Fe-Si Anot yataklarında anot performanslarının eldesi
4. Katodik koruma kriterlerinin irdelenmesi

Bu çalışmada, jeotermal kaynaklar açısından zengin olan ülkemizde , sistemin gereği ısı kaybına engel olmak amacıyla kullanılan poliüretan köpük kaplamalı boruların katodik koruma esasları tesbit edilmiştir. Bu boru hattının yanında yine kullanılması gerekli olan soğuk su borusu ile aralarında oluşabilecek interferans etkilerin magnezyum anot kullanılarak önlenmesine çalışılmıştır.

2. LİTERATÜRDE YER ALAN ÇALIŞMALAR,

Decarlo, Wagner(1988), katodik koruma datalarını elde etmek için sahada veri kaydediciler kullanmışlardır. Veri kaydedici cihazlarla katodik koruma uygulanmış boru hattının ölçümleri yapılmıştır.Bu ölçümler, boru/zemin potansiyellerini, redresör ve anot çıkış değerlerini, anot yatağı direnci ölçümlerini içermektedir.

Orton (1985), Yeraltına konulmuş olan boru hatlarında , giydirilmiş ve yapışma özellikleri zayıf olan kaplamaların katodik olarak korunmaları halinde çelik yapı ile kaplama arasındaki bölgede borunun potansiyellerindeki değişimini incelemiştir.

Bunun için 8 metre uzunluğunda 48 inch çapında bir boru parçası giydirmeye tipi kaplama ile kaplatılmış ve tuzlu çamur-kum toprağı içerisine gömülmüştür. Gömülü boruya farklı katodik koruma akımları uygulanmıştır. Boru potansiyelleri, boru iç duvarında yerleştirilmiş olan referans elektrodlar kullanarak ölçülmüştür.

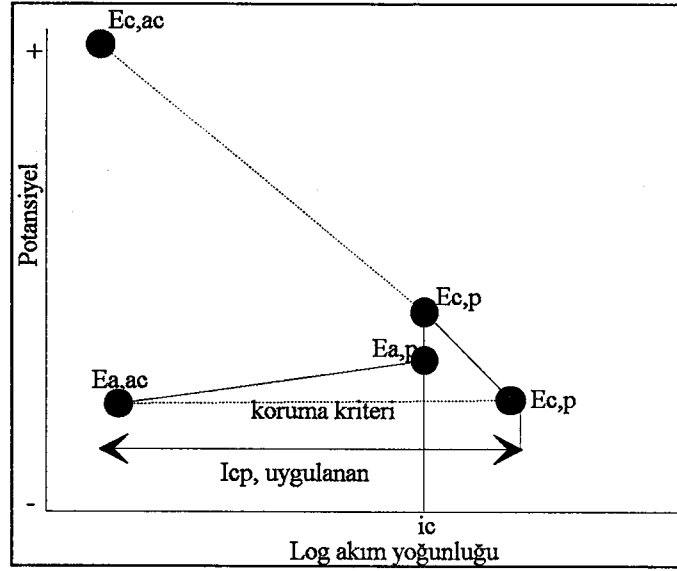
Araştırmacılar , bu çalışmalar sonunda , katodik korumanın bu tür giydirmeye tipi kaplamaya sahip borularda , boru hattı sulu toprakta olması halinde uygulanabileceğini, şayet toprak kuru (direnci çok yüksek anlaşılmalıdır) ve boru hattı giydirmeye tipi ise katodik korumaya gerek olmayacağını belirtmişlerdir.

Bazzoni ve Lazzari (1992), Betonarmede borularda katodik koruma sistemlerinin görüntülenmesi ve kontrolü için yeni bir yaklaşım önerilmişlerdir.

Hussock and Wilson (1984), Hidrojen gazı oluşumu reaksiyonundan dolayı kaplamalı borularda koruma potansiyel kriteri tesbitine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada ,füzyon, bağlı epoksi, kömür katranı, plastik kaplama ve asfalt kaplama olmak üzere dört farklı kaplama için musluk suyu içinde hidrojen oluşumu -1.12 V'luk polarizasyon potansiyelinde başladığı ve uygulanan akım arttıkça daha şiddetli olduğu gözlenmiştir.

Gummow (1986) , NACE katodik koruma uygulamalarında RP-01-69 nolu standartı tavsiye etmiştir. Bu standart, "Yeraltında veya su içindeki metal boruların katodik koruma kriterlerini" içermektedir. Bu kriterleri doğrulamak için bu kriterler tekrar gözden geçirilmeli, bunu sağlamak için de sadece polarizasyon potansiyeli kullanılmalıdır.

Mears ve Brown "katodik koruma bütünüyle verimlidir. Ancak, korozyon olaylarındaki yerel katotlar yerel anotların potansiyellerine kadar polarize olmalıdırlar" demişlerdir (Şekil 1).



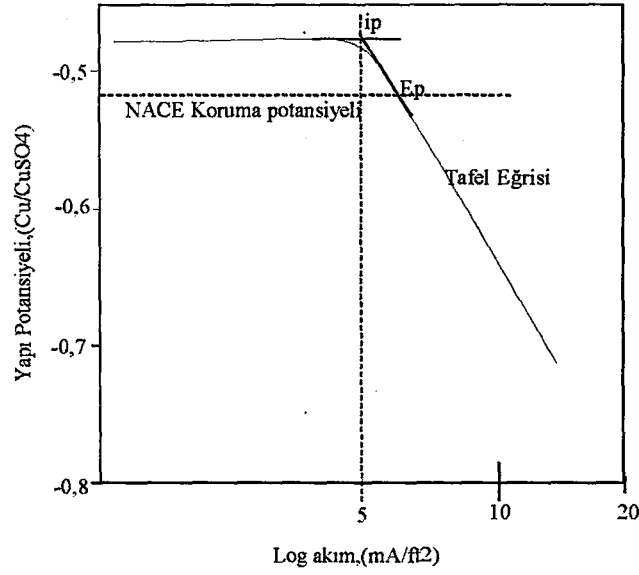
Şekil 1. Korozyon hücresinin tipik polarizasyon grafiği (Gummow, 1986)

Mevcut NACE standardındaki demir için verilen kriter aşağıda belirtildiği gibidir:

"Doygun bakır/bakırsülfat referans elektrod ile yapı arasındaki en az 0.85 V'luk negatif potansiyel farkı".

"Bir referans elektrod ile metal yüzeyi arasında en az 100 mV negatif polarizasyon kaymasının sağlanması. Bu polarizasyon kayması, koruyucu akımın kesilmesi sonucu polarizasyon potansiyelinin azalmasının ölçülmesiyle belirlenir".

Havalandırılmış elektrolitlerde, Şekil-2 'de görüldüğü gibi polarizasyon eğrisi tipik bir şekilde ortaya çıkabilir. Holleri Potansiyel/akım eğrisinde Tafel eğiminin iyi havalandırılmış koşullarda elde edilemediğini doğrulamıştır.



Şekil 2: E log I Tafel eğrisi

E log I kriteri, keson borularının koruması için gereken akımın tespiti için kullanılmaktadır. Ancak bu kriter yaygın olarak kullanılmasına rağmen, akım kriteri yerine potansiyel kriterini kabul eden NACE standardına uymamaktadır. Ancak kabul gören uygulama Şekil 2' deki E_p potansiyelindeki akımın, sistem için nominal tasarım akımı olarak kabul edilmesidir.

E-log I kriteri kullanışlı bir standart olması için onun bir potansiyel kriteri olmadığını, bir minimum akım kriteri olduğu bilinmelidir. Ayrıca havalandırılmış ortamlardaki yapılar için uygulamalardaki sınırlar ve ölçüm teknikleri ve bilgi yorumlama biçimleri bu standardın ayrılmaz parçasıdır..

Burada sunulan çalışma, laboratuvarında katodik soyulma testlerinde ele alınan değişik kaplama türlerinin soyulma mekanizmalarında temelde değişiklikler olabileceğini ifade etmektedir. Farklar, kaplamanın bükülmezliğinde ve onun topraktaki basınçtan nasıl etkilendiğine ve özellikle de zarar görmüş yerlerde ısıya bağlı olarak ortaya çıkar. Bu çalışma, bant

kaplı boruların toprak altında zarar görmüş bölgelerine toprak basıncının etkisini belirlemek gayesiyle yapılmıştır.

Nicholas (1986), galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde anot sayıları ve anot yatağı dizaynı için elektronik çalışma tablolarında kullanılmak üzere bir program geliştirmişlerdir. Programı, anot yatağı veya anot direncini hesaplamak üzere kullanılan Dwigth formülünden yararlanarak hazırlamışlardır. Hesaplamalar yapılırken, programa;

- Boru boyu
- Boru çapı
- Kaplama etkinliği
- Zemin Rezistivitesi,
- Akım yoğunluğu
- Boru potansiyeli, (P/S)
- Anot tipi (Zn, Mg, HpMg Anot)
- Paralel anot sayısı
- Anot fiyatları

değerleri girilmektedir. Bu değerler girildikten sonra, bilgisayar ekranında,

- Boru yüzey alanı
- Hesaplana katodik koruma akım ihtiyacı
- Gerekli anot sayısı
- Anot bölgeleri arasındaki mesafe
- Anot ömrü
- Anotlardan çekilen akım
- Anot fiyatları
- Montaj maliyeti
- Toplam ,fiyat sonuçları görülmektedir.

Araştırmacı, hazırlanan proğramın dizayn mühendislerine bu tür uygulamaların dış akım kaynaklı sistemler içinde hazırlanabileceğini, bu programların, katodik koruma yapılacak sistem ile ilgili sahada yapılacak ölçümleri değerlendirerek dizayn yapabilecek şekilde detaylandırmanın mümkün olabileceğini belirtmektedir.

Toncre (1984), giydirme tipi kaplamalı borulara yapılmış olan katodik koruma sistemlerine ait sahada yapılmış olan ölçümlerin, borunun gerçek polarize durumunu yansıtmadığını ortaya koymuştur. Mevcut katodik koruma kriterlerinin bu tip kaplamalar için bir koruma potansiyelini önermediğı, bu tip kaplamalı borularda katodik koruma potansiyelinin sağlanabilmesi için daha negatif değerlere çıkılması gerektiğini önermektedir.

R.J.Kuhn'un (1933)'te (Fe için) -850 mV kriterinin boru hattını korumak için yeterli kriter olarak göstermesine rağmen, gerçek alan uygulamaları ile bu teorinin ilişkilendirilmesinin hala tartışma konusu olduğunu ,bu kriteri desteklemek amacıyla bazı araştırmacıların alternatif ölçüm teknikleri üzerine çalışmalar yapmasına neden olduğunu belirtmektedir.

Araştırmacı, klasik koruma kriteri ölçümlerine alternatif olarak yapılan çalışmalarda,

-5 V a kadar olan potansiyel düşüşlerin, yüksek dirençli zeminlerdeki borularda kaplamanın katodik soyulmasına neden olmadığı,

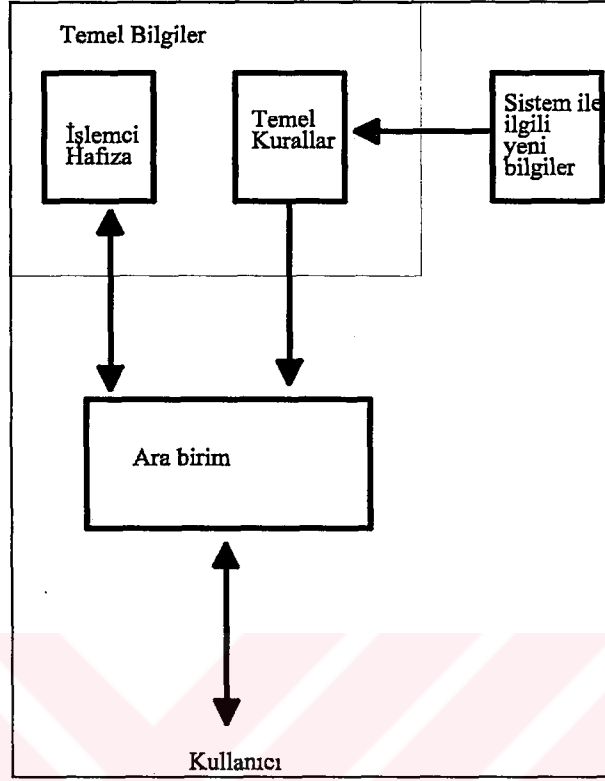
-1 V a kadar olan potansiyel düşüşlerin ise düşük dirençli zeminlerdeki borularda kaplamanın katodik soyulmasına neden olmadığı, sonuçlarına varmıştır.

Degerstedt ve Kennelley,(1986), klasik metotlarla yapılan katodik koruma hesaplamalarında kaplama etkinliğinin ,akım ihtiyacının ve akım çıkışının anot-zemin direnci kullanılarak hesaplandığı, fakat bu hesaplamalarla daima gereğinden fazla malzeme kullanıldığı bununda atıl malzeme ve fazla enerji kullanımına sebep olduğunu belirtmiştir.

Nicholas (1986), katodik koruma sistemleri içi bilgisayar programları yazılmaya ve kullanılmaya başlandığını belirtmektedir. Bu programlar gerek galvanik anot dizaynı gerekse dış akım kaynaklı katodik koruma sistem dizaynlarında kullanılabileceğini belirtmiştir.

Bilgisayar programları yapılmaya çalışılan sistem yeraltı boru hatlarında katodik koruma dizaynına yöneliktir.

Sistemin akış diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. Katodik Koruma sistem dizaynı

Proğrama aşağıdaki bilgiler kullanıcı tarafından girilir.

- A) Malzeme (Çelik, bakır, alüminyum)
- B) Uzunluk
- C) Çap
- D) Kaplama verimi (%)
- E) Yapının elektriksel devamlılığı

Elektriksel İzolasyon çevre ile ilgili

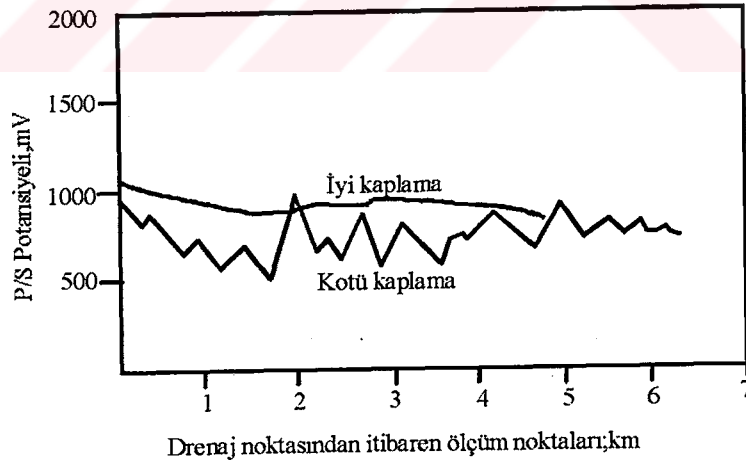
- A) Zemin direnci
- B) Zemin tipi

Bu program katodik koruma dizayn mühendisine , kendi sistemi ile ilgili çevresel etmenleri , ekonomik maliyet analizini , dizaynda bakteri korozyonun etkisini, yabancı yapıları vb. değişkenleri gözönüne alan bir

dizayn sunmaktadır. Bu sayede dizayn mühendisi çok kısa bir zaman içinde ilgili dizayna ait bir yorumda değişiklik yapma imkanına sahip olacaktır.

J.L.Banach (1988), Yaygın boru kaplama malzemesi olarak kullanılan kömür-katranı , bitüm , polietilen bant, epoksi, bitüm mastik ve üretan kaplamaların boru hattının işletme ve ilk yatırım maliyetlerine göre değerlendirmelerini yapmıştır.

Araştırmacı, iyi ve kötü kalitede kaplanmış , aynı zeminde bulunan ve katodik koruma uygulanmış iki farklı boru hattı üzerinde belirli km lerde boru/zemin potansiyel ölçümleri yapmıştır. Bu ölçümler sonucunda iyi kaplanmış boru hattı boyunca potansiyellerinde çok az değişimlerin olduğu, kötü kaplamalı boru boyunca ise potansiyel değişimlerin çok fazla olduğu gözlenmiştir.(Şekil.4)



Şekil- 4 : İyi ve kötü kaplanmış boru hatları boyunca potansiyel değişim

Mills (1988), boru hatlarında korozyonun meydana gelmesinde termodinamik etkileri , katodik koruma sistemlerinde kaplamanın önemi ve kaplamanın zamanla değişiminin gözlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Araştırmacı, oksijen diffüzyonuyla kaplama altında oluşan depolarizasyon hızının , kaplamanın elektriksel direncinin oluşturduğu polarizasyon hızından daha fazla olması halinde bunun , kaplama için tehlikeli bir durum oluşturacağını belirtmektedir. Katodik koruma mühendislerinin , kaplamayı katodik korumanın ayrılmaz bir parçası olarak algılamalarını ve tasarımlarında kaplama ile ilgili araştırmalarında da büyük bir hassasiyet göstermelerini önermektedir.

Yalçın ve Koç (1982,uzun süredir yeraltında bulunan boru hatlarının katodik koruma akım ihtiyacının deneysel olarak belirlenmesi için deneyler yapmışlardır. Bu deneyler de , mevcut boru hattına geçici bir anot yatağı yapılarak, dışarıdan bir akım uygulanmasıdır. Uygulanan akıma karşılık gelen boru/zemin potansiyeli değerlerinin katodik polarizasyon eğrilerini çizerek korozyon akım değerini tesbit etmişlerdir. Araştırmacılar, polarizasyon kırılma yöntemi ile korozyon akımının tayini deneylerinde, polarizasyon eğrisi üzerinde yeterli bir lineer bölgenin belirlenememesinden dolayı bu deney yöntemi ile arazi koşullarında elde edilen sonuçların bir çok bilimsel kaynak ile desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

3. KOROZYON ve KOROZYONDAN KORUNMA

3.1 Korozyon

Geleneksel anlamda korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile verdikleri elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozunmalarıdır. Bu nedenle, korozyon deyimi yapı malzemesi niteliği olan tüm malzemelerin çevrenin etkisi ile bozunmalarını kapsar. Dilimizde kesinlikle yerleşmemiş olmakla beraber paslanma deyimini demir ve demir cinsinden olan malzemelerin (çelik ve dökme demirler) korozyonu, pas deyimini de aynı tür malzemelerden kaynaklanan korozyon ürünü anlamında kullanılmaktadır. (Doruk,1982)

Yukarıda verilen tarife bakılınca korozyon oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre kimyasal ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki tür korozyon olayından söz etmek gerekecektir. Kimyasal korozyon, metal ve alaşımların içinde bulundukları ortamlar içindeki oksitlenmesidir. Metal ve alaşımların elektrolitik ortamlar içinde bozunmaları ise elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılır. Gerçekte her iki korozyon türünün de elektrokimyasal mekanizma ile oluştuğu bilinmektedir. Ancak, temeldeki farksızlığa karşın kimyasal ve elektrokimyasal korozyon ayırımı yerleşmiş bulunmaktadır.

3.1.1 Korozyonun önemi

Korozyonun doğrudan ve dolaylı olarak yol açtığı ekonomik kayıplar önemini belirleyen en önemli göstergedir. Doğrudan kayıpların en önde

geleni harcanan metaldir. İndirekt korozyon ise korozyona karşı verilen savaşta başvurulmuş önlemler, korozyona dayançlı malzemeler, yüzey kaplamaları, inhibitör kullanımı ve görevini yapamıyacak derecede bozunmuş parçaların yenileri ile değiştirilmeleridir. Amerika Birleşik Devletlerinde korozyonun yıllık maliyeti 8 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir. .(Çakır, Akgün ve Ürgen,1990)

Korozyonun yol açtığı kayıpların toplamı endüstriyel gelişmişlik düzeyi ile yakından ilgilidir ve tahminlere göre gayri safi milli gelirin %1'inden başlayarak %3.5'uğuna kadar yükselebilmektedir. 1970 yılında yapılan bir çalışma İngiltere'de korozyonun kayıplarının bu ülkenin gayri safi milli gelirinin %3.5'uğu düzeyinde olduğunu göstermektedir. (Çakır, Akgün ve Ürgen,1990)

3.2 Korozyonun Elektrokimyasal İlkeleri

Korozyon elektrot- elektrolit ara yüzeyinde oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Anodik olay , atomların belirli sayıda elektronunu metal yüzeyine bırakarak pozitif yüklü iyonlara dönüşmeleridir. Elektrolit elektronların geçişine olanak vermediğinden , bunlar metalik yolu izleyerek katot yüzeyine ulaşırlar ve katot- elektrolit ara yüzeyinde yeralan olayların (katodik olaylar) sonucu harcanarak kaybolurlar. Mevcut koşullar altında elektronların kaybolma hızı yavaşlamış veya sıfıra inmişse korozyon hızı da aynı ölçüde yavaşlamış veya sıfıra inmiş olur.

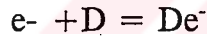
A . Anodik olay : Metal atomlarının elektron vererek pozitif yüklü metal iyonlarına dönüşmeleridir.



Açığa çıkan elektron metal üzerinde toplanır. Bunlar metal gövdesi üzerinden katot bölgesine taşınır.

Anot reaksiyonu sonucu oluşan metal iyonları çözeltiye geçer. Ancak bazı hallerde yüzeyde çözünmeyen bileşikler halinde anot yüzeyinde toplanabilir. Bu durumda anodun çözünmesi gittikçe güçleşir. Buna anot polarizasyonu denir.

B. Katodik Olay : Katodik olayın işlevi anodik olayla üretilen elektronları harcamaktır. Katodik olayın oluşabilmesi için elektron alabilen (yani indirgenebilen) iyonlara ihtiyaç vardır. Elektrolit içindeki bu tür iyon veya molekülleri D simgesi ile göstererek katodik olayı;



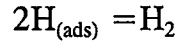
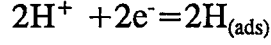
formülü ile gösterebiliriz.

Katotta daima indirgenme reaksiyonu meydana gelir. Doğal sular ve zeminler içinde katodik olay için iki temel reaksiyon vardır.

3.2.1 Hidrojen çıkışı yoluyla yürüyen katot reaksiyonu

Sulu çözeltiler içinde daima $[\text{H}^+]$ iyonu mevcuttur. $[\text{H}^+]$ iyonu konsantrasyonu çözeltinin pH değerine bağlıdır. Saf suda $\text{pH} = 7$ dir. Doğal su ve zeminlerin pH değeri $4 < \text{pH} < 9$ arasında değişir. pH ne kadar küçük

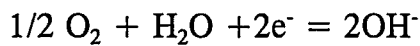
ise hidrojen çıkışı da o kadar kolaylaşır. Hidrojen çıkışı ile yürüyen katot reaksiyonu ,aşağıdaki şekilde iki basamaklıdır.(Yalçın ve Koç,1995)



Çözelti içinde bulunan $[H^{+}]$ iyonları katottan elektron alarak önce (H) atomu haline geçer. Bu hidrojen atomları metal yüzeyine absorblanır. Hidrojenin gaz halinde uzaklaşabilmesi için, iki hidrojen atomunun birleşerek hidrojen molekülü haline dönüşmesi gerekir. Bu olay katot yüzeyinde yeteri miktarda hidrojen atomunun toplanması ile meydana gelebilir. Bu durum metal yüzeyinde bir aşırı gerilimin doğmasına neden olur. Buna katodik polarizasyon denir.(Yalçın ve Koç,1995)

3.2.2 Oksijen indirgenmesi yoluyla yürüyen katot reaksiyonu

Doğal sular içinde daima bir miktar çözünmüş oksijen bulunur. Bu oksijen katottan elektron alarak aşağıdaki reaksiyon ile hidroksit haline dönüşür.



Doğal su ve zeminde içinde katot reaksiyonu genellikle bu yolla yürür. Bu reaksiyon sonucunda da katot bölgesinde yeni hidroksil iyonlar oluşur.Katot bölgesine oksijen difüzyonu genellikle atmosferden olur. Eğer katot bölgesi yeterli oksijen alamazsa, bu reaksiyon bir süre sonra durur. Bu

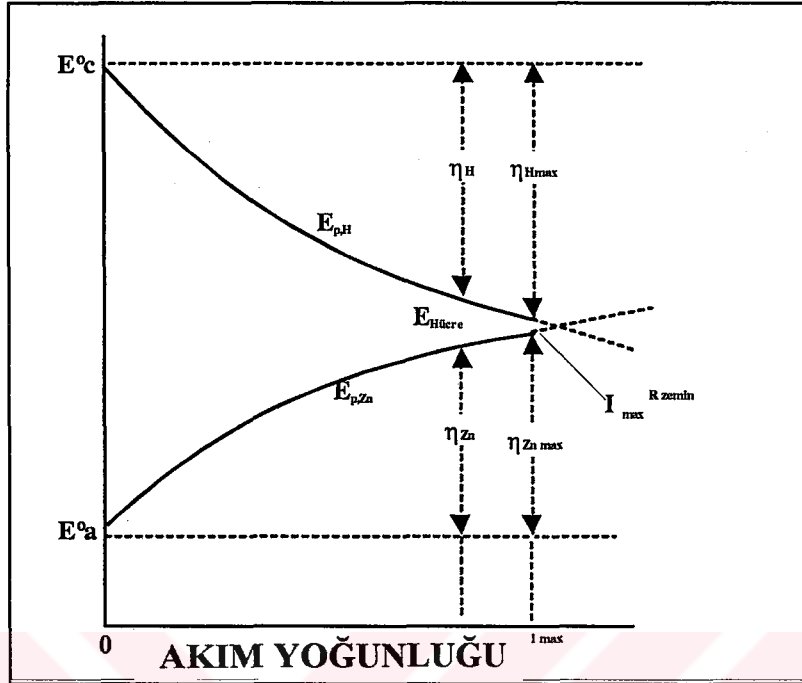
nedenle yeraltı ve sualtı korozyonunda korozyon hızı çoğu zaman katot bölgesine oksijen difüzyon hızına bağlı kalır.(Yalçın ve Koç,1995)

3.2.3 Polarizasyon

Korozyon hücresinden bir miktar akım geçtikten sonra, anot ve katotta meydana gelen kimyasal reaksiyonların etkisi ile elektrot potansiyellerinde değişme olur. Yukarıda açıklandığı üzere katot polarizasyonuna metal yüzeyindeki hidrojen birikmesi neden olur. Anotta ise, oluşan korozyon ürünleri çözünmeyen bileşikler halinde yüzeyi kaplıyarak polarizasyona neden olur. Polarizasyon sonucu, korozyon hücresinin anot ve katot potansiyel farkı gittikçe azalır.(Şekil.5) Şekilde görüldüğü üzere korozyon hücresinin anot ve katot potansiyel farkı başlangıçta maksimum değerdedir. Devreden akım geçtikçe, anot ve katotta meydana gelen polarizasyon nedeniyle bu fark gittikçe azalır. Buna paralel olarak korozyon akımında da artma olur.

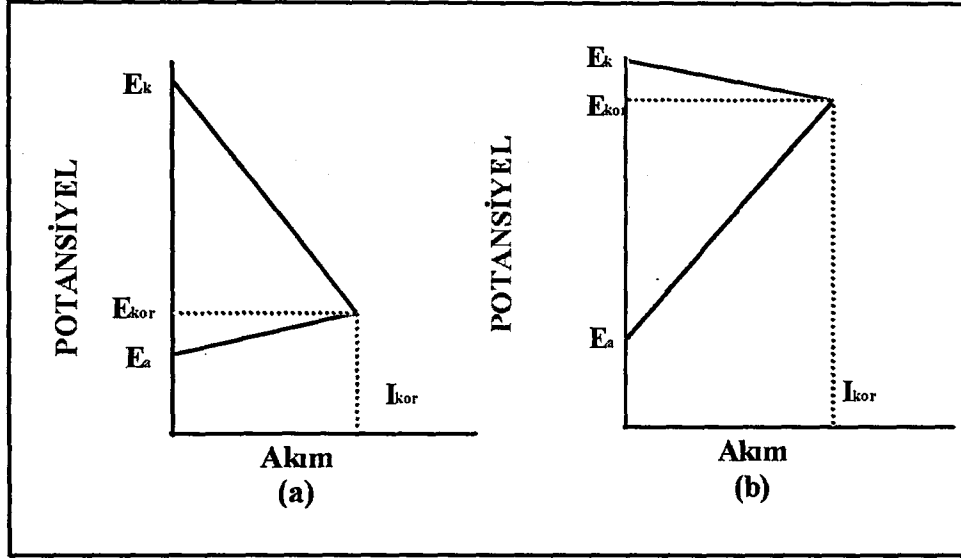
Dengeye erişildiğinde korozyon hücre potansiyeli şu bağıntı ile ifade edilebilir.

$$E^o = E_A^o - E_c^o = n_A + n_C + i_{cor} \cdot R$$



Şekil 5 :Bir korozyon hücresinde anot ve katot polarizasyonu

Görüldüğü üzere korozyon akımı, doğrudan anot ve katot polarizasyonlarının büyüklüğüne bağlıdır. Anot ve katot polarizasyonları metal cinsi ve ortam koşullarına göre değişir. Bazı halde katot polarizasyonu, bazen da anot polarizasyonu korozyon hızını kontrol eder. Şekil.6'de katodik ve anodik polarizasyon kontrolunda olan korozyon hücreleri görülmektedir.



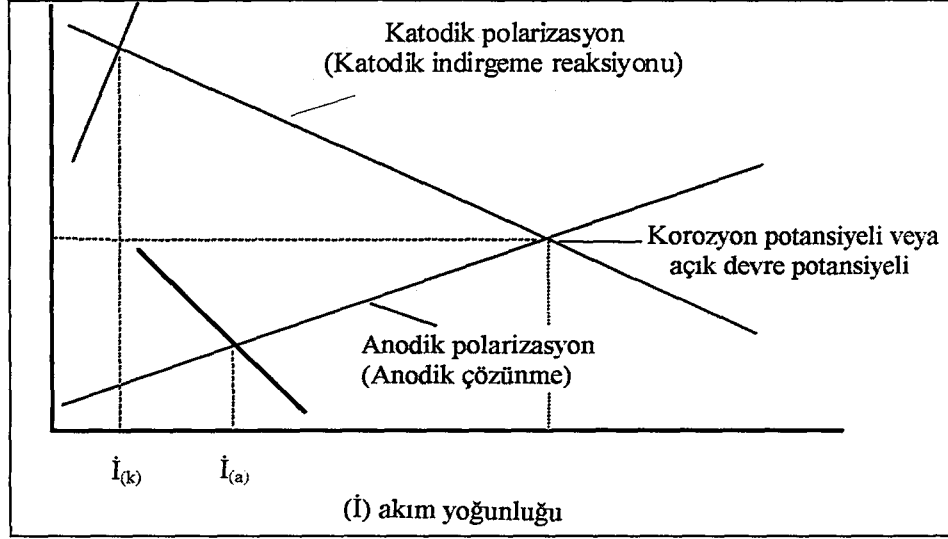
Şekil 6. Değişik polarizasyon kontrollü korozyon hücreleri

3.2.4 Anodik ve katodik polarizasyon

Bir elektrodun bir çözelti içine daldırılması halinde, belli bir süre sonra elektrod potansiyeli bir denge değerine erişir. Denge potansiyeli sabit bir değer olmakla beraber dinamik bir durumdur. Elektrod yüzeyinde anodik ve katodik yönde gelişen polarizasyon olayının bir dengesidir.

Elektroda anodik veya katodik yönde akım uygulanarak, denge potansiyelinden itibaren anodik veya katodik polarizasyon eğrileri elde edilebilir.

İki farklı elektrodun bir birine bağlanması halinde, elektrodların potansiyeli, biri anodik yönde diğeri de katodik yönde polarize olur. Böylece elektrot çift yeni bir karma potansiyel değerinde dengeye gelir. Dengedeki oluşan bu potansiyel değerine korozyon potansiyeli denir. (Şekil-7)



Şekil 7: Bir korozyon hücresi içindeki anodik ve katodik polarizasyonu gösteren eğri (Çakır,1990) (EVANS)

3.3 Yeraltı Korozyonu

Çeşitli amaçlarla yeraltına veya su altına konulmuş olan metal yapılar özellikle çelik borular, kazıklar, tanklar, suyun ve zeminin korozyon etkisi nedeniyle kısa sürede korozyona uğrayarak kullanılmaz hale gelirler. Yeraltı ve su altında korozyon hücrelerinin oluşma nedenleri çok çeşitlidir. Pratikte en çok rastlanan korozyon nedenleri şunlardır.

- Galvanik etki
- Zemin yapısındaki farklılık
- Farklı havalanma
- Kaplama bozuklukları
- Biyolojik etki
- Kaçak akım ve interferans

Bunlardan hangisinin daha çok etkili olacağı söz konusu metalin ve bulunduğu çevrenin yapısına ve özelliklerine bağlıdır. Bazı halde yalnız biri, bazı halde de bütün faktörler birlikte metali korozyona uğratabilir.

3.3.1 Galvanik korozyon

Basit olarak benzer olmayan metal korozyonu diye bilinen bu tür bir bozunma beklenmeyen yerlerde ortaya çıkar ve sık sık en tehlikeli sonuçlar oluşturur. Aynı elektrolitik ortamda birlikte bulunan metallerin hangisinin korozyona uğrayacağını galvanik seri belirler. (Schweitzer,1983)

3.3.2 Kaplama bozukluğu nedeniyle oluşan korozyon

Kaplama yapılmış bir borunun potansiyeli ile kaplamasız borunun potansiyeli birbirinden farklıdır. İşçilik hataları nedeniyle kaplamanın bazı bölgelerinin bozulması veya delinmesi halinde bu bölgeler anot olacaktır.

Bu tip korozyon , metal yüzeyinde çok küçük bölgelerde yoğunlaşan bir korozyondur. Homojen dağılımlı korozyon olayındaki madde kaybına göre çok daha az madde kaybı olmasına rağmen, borunun kısa bir sürede delinmesine neden olduğu için pratikte büyük tehlikeler yaratabilir.

3.4 Korozyondan Korunma

Bir boru hattında muhtemel korozyonu önlemek üzere başlıca aşağıdaki önlemler alınır:

1. Boru yüzeylerinin uygun bir malzeme ile kaplanması
2. Katodik koruma yapılması

Bu önlemler ayrı ayrı uygulanabildiği gibi ikisi birlikte de uygulanabilir..

3.4.1 Boru yüzeylerinin uygun bir malzeme ile kaplanması ve kaplama tipleri

Boru kaplamasında çok eskiden beri bitümlü malzemeler kullanılmaktadır. Son zamanlarda epoksi tipi sentetik reçineler ve plastikler ile kaplama yöntemleri de geliştirilmiştir.

Bu malzemelerin, elektriksel iletkenlikleri, boruya yapışma ve yeraltında dayanma ömrüürleri birbirinden farklıdır.

Ülkemizde başlıca aşağıdaki kaplama tipleri kullanılmaktadır

3.4.1.1 Sıcak tatbikli bitüm kaplamalar

Yumuşama noktası en az 75°C, en çok 120°C olan bitüm % 25-35 oranında inert dolgu ile hazırlanan kaplama malzemesi eritilerek sıcak halde kaplama yapılır.(TS 4356) Bu malzemeler soğuduktan sonra sert bir kabuk oluşturur. Bu nedenle bu kaplamalara "enamel" adı verilir.

Bitüm kaplama uygulaması bir veya iki kat bitüm emdirilmiş cam elyaf sargı kullanılarak da yapılabilir. Sargılı ve sargısız kaplama kalınlıkları Tablo-1 de verilmektedir.

Tablo 1. Sıcak tatbikli Bitüm kaplama cins ve kalınlıkları(TS-4356)

Kaplama Cinsi	Kaplama Kalınlığı,mm
Sıcak asfalt kaplama	2,4 ± 0,8
Tek kat sargılı sıcak asfalt kaplama	3,2 ± 0,4
Çift kat sargılı sıcak asfalt kaplama	6,0 ± 0,6
Boru ek yerlerinin kaplanması	Normal kaplamanın bir kat fazlası

3.4.1.2 Soğuk tatbikli bitüm kaplamalar

Asfalt uygun solventler içinde çözülerek ve yeterli miktarda inert dolgu maddesi katılarak fırça ile sürülebilecek kıvamda bir kaplama malzemesi elde edilir. Bu malzeme astar vurulmuş boru üzerine fırça ile veya tabanca ile püskürtülerek uygulanabilir. Malzeme içinde bulunan solvent kısa sürede buharlaşarak boru yüzeyinde sert bir kabuk meydana gelir. Gerekğinde üst kısma bitüm emdirilmiş cam elyaf sargıda yapılabilir. (TS-5139)

3.4.1.3 Epoksi tipi kaplamalar

Bu malzemeler iki bileşenlidir. Kaplama yapılmadan önce iki bileşen uygun oranlarda karıştırılır. Uygulama yapıldıktan sonra en çok 12 saat içinde sertleşir. Sağlam bir kabuk oluşturması için epoksi reçine maden kömürü katranı katılarak kullanılmaktadır(TS-5140). Kaplama kalınlığı 3,5-5 mm arasındadır.

3.4.1.4 Bant sargılar ve plastik kaplamalar

Temizlenmiş boru üzerine uygun bir yapıştırıcı astar malzeme sürülür veya boru ısıtılarak üzerine toz halde astar malzemesi püskürtülür. Boru

yüzeyinde eriyen plastik malzeme boruya sağlam şekilde yapışır. Bu astar üzerine polietilen bant sargısı yapılır. (TS-5139) Kaplama kalınlıkları boru çapına bağlı olarak bu standartta verilmiştir.

3.4.1.5 Beton kaplamalar

Yeraltı boru hatlarını korozyondan korumak için beton ve harç kaplama da kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem, boru yerine konulduktan sonra kare kesitli bir tahtakalıp içine alınarak çevresine beton dökülmek suretiyle yapılan kaplamadır. Kaplama kalınlığı en az 5 cm olmalıdır. Beton dozajı 2 kısım kum + 1 kısım çimento olacak şekilde seçilmelidir. Taze betonun kalıp içine dökülmesi sırasında, boru alt kısımlarına kolayca akabilecek şekilde beton akıcı kıvamda olmalıdır. Beton içinde hava boşluğunun minimum düzeyde kalmasına dikkat edilmelidir. Bunu sağlamak için beton içine hava sürükleyici katkı maddesi ve beton kıvamını artırıcı katkı maddeleri katılması faydalıdır. Kalıp söküldükten sonra, beton yüzeyleri asfalt ile kaplanır. Beton dökümünden önce taban kısmına da bir miktar asfalt dökülmesi betonun geçirimsizliği açısından faydalı olur.

3.4.1.6 Poliüretan kaplamalar

Özellikle ısı yalıtımında kullanılan bu tür kaplamalar, jeotermal enerji ile yapılan ısıtma projelerinde çelik boru kullanılması halinde kullanılmaktadır. 5 ve 6 cm kalınlığında boru dış yüzeyine uygulanan poliüretan kaplamalar borunun hem elektriksel hemde ısıl izolasyonunu sağlamayı amaçlamaktadır.

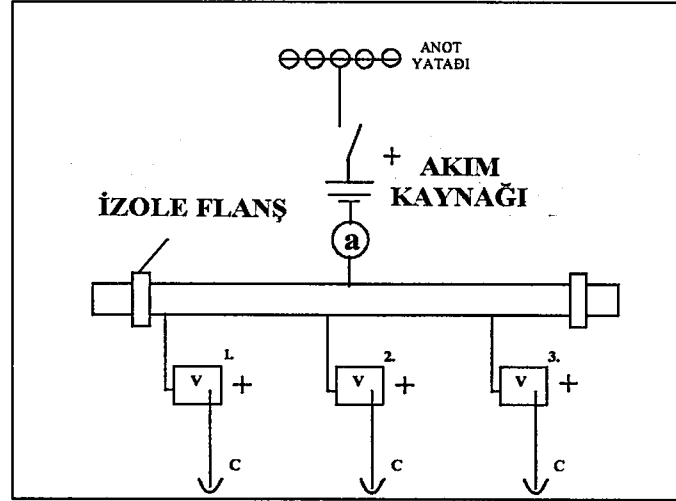
Bir kaplamanın elektriksel direnci yalnız kaplama malzemesi ve kalınlığına bağlı olmayıp, boru yüzeylerinin kaplamadan önceki temizliği ve işçilik kalitesine de bağlıdır..Bu nedenle literatürde kaplama dirençleri çok geniş aralıklarla verilmektedir. Çeşitli malzemelerle yapılmış olan kaplamaların yaklaşık elektriksel dirençleri ve katodik koruma akım ihtiyacı değerleri Tablo-2 de verilmektedir.

Tablo 2. 1 metre çapında ve 1 km uzunluğundaki kaplamalı bir çelik borunun 1000 Ohm.cm dirençli bir zemin içindeki akım ihtiyacı (Baeckmann,1973)

Kaplama cinsi	Elektriksel direnci, Ohm.m ²	Katodik koruma akım ihtiyacı, Amper
Çıplak Boru	10-59	30
Eski Bitüm kaplı kaplama	500	2
	1000	1
Tek kat sargılı bitüm kaplama	2500	0,40
	5000	0,20
İki kat sargılı bitüm kaplama	10000	0,10
	50000	0,02
Polietilen kaplama	100000	0,01

3.5 Akım ihtiyacı ve kaplama direnci tayini deney yöntemleri

Bir boru hattının zemin içindeki elektriksel direnci, çeşitli yöntemlerle deneysel olarak tayin edilebilir. Pratikte en kolay uygulanabilir deneyin devre şeması Şekil 8 de görülmektedir.



Şekil 8. Kaplama direncinin deneysel olarak tayini

Kaplama direncini deneysel olarak tayin etmek üzere yaklaşık 4-5 km uzunluğunda üniform bir boru parçası seçilir. Bu boru parçası iki ucundan izole edilir. Bir geçici anot yatağı ile ortadan yeteri şiddette bir katodik akım uygulanır. Boru hattının her iki ucundaki boru-zemin potansiyeli, doygun Cu/CuSO₄ referans elektroduna göre en az -0,850 Volt olmalıdır. Boruya uygulanan akım şiddeti bir ampermetreden ölçülür. Boru hattı boyunca en az üç kontrol istasyonundan boru-zemin potansiyeli akım altında (on) ve akım kesilerek (off) ölçülür.

Birim uzunluktaki borunun kaplama direnci

$$R = DV/I$$

Birim uzunluktaki borunun kaplama direnci

$$R(\text{Ohm.m})$$

Birim yüzey alanın kaplama direnci

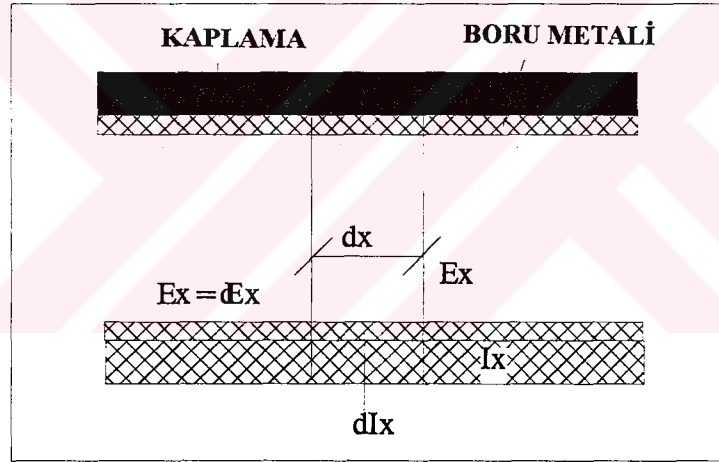
$$R(\text{Ohm.m}^2)$$

bulunur.

3.5.1 Boru -zemin potansiyeli değişimi ve akım ihtiyaçı

Boru hattına akım uygulanan noktada boru-zemin potansiyeli maksimum olur. Akım uygulanan noktadan uzaklařıldıkça boru-zemin potansiyelinde dūřme olur. Kaplamasız veya kaplama direnci kūçük olan boru hatlarında potansiyel dūřūřü daha fazladır.

Katodik olarak korunmuş bir boru hattında potansiyelin, kaplama ve boru iç direncine bağlı olarak değişimini hesaplamak üzere (dx) uzunluğunda bir boru parçasını ele alalım.şekil.9



şekil 9. Bir boru hattında akım ve potansiyel değişimi

Boruya belli bir noktadan (I) akımı uyguladığımızı dūřünelim. Kaplama direnci (R) , boru iç direnci (r) olsun. Borunun akım uygulanan noktadan itibaren (x) m uzaklıktaki bir (dx) parçası için aşağıdaki gibi ifade edilebilir..

$$dI = \frac{E}{R} dx$$

$$\frac{dI}{dx} = \frac{E}{R}$$

$$dE = rI dx$$

$$\frac{dE}{dx} = rI$$

Bu ifadenin (x) e göre ikinci türevi alınır,

$$\frac{d^2E}{dx^2} = r \frac{dI}{dx}$$

bulunur. Burada (dI/dx) terimi yerine denklemdeki değeri konularak ,

$$\frac{d^2E}{dx^2} = E \frac{r}{R}$$

$$\frac{d^2E}{dx^2} - E \frac{r}{R} = 0$$

İkinci dereceden diferansiyel denklemi elde edilir. Bu denklem, sabit değer $r/R = a^2$ yazılarak çözülecek olursa ,

$$E = Ae^{ax} + Be^{-ax}$$

ifadesi elde edilir. Burada (A) ve (B) katsayıları sabit değerler olup, özel haller yardımı ile hesaplanabilir. Pratikte başlıca iki özel hal söz konusu olur.

Birinci hal.

3.5.2 Sonsuz uzunlukta bir boru hattının korunması

Boruya akım uygulanan noktadaki potansiyel değişimini bulmak üzere son denklemde $x=0$ yazılırsa,

$$E_0 = A + B$$

bulunur. Diğer taraftan (x) in sonsuz değerini alması halinde , borunun potansiyel değişiminin sıfır olacağı göz önüne alınarak , denklemde $x=\infty$ konulduğunda $A=0$ elde edilir. O halde sonsuz uzunluktaki bir boru hattına bir noktadan akım uygulanması halinde , x m mesafedeki borunun potansiyel değişimi için,

$$E_x = E_0 \cdot e^{-ax}$$

ifadesi elde edilir.(x) mesafesinde borudan geçen akım şiddeti için bu ifadenin her iki tarafı direnç ile bölünerek,

$$I_x = I_0 \cdot e^{-ax}$$

elde edilir. Burada,

E_x =Boruya akım uygulanan noktadan itibaren (x) m mesafedeki potansiyel değişimi, Volt

E_0 =Boruya akım uygulanan noktadaki potansiyel değişimi, Volt

a = Potansiyel düşüş sabiti (attenuation sabiti)

$$a = \sqrt{\frac{r}{R}}, (1 \text{ metre boru uzunluğu için})$$

İkinci Hal:

Belli uzunlukta bir boru parçasının korunması

Bu durumda ifadenin (x)e göre türevi alınarak denklem de değeri yerine konulursa,

$$I = \frac{a}{R} (Ae^{ax} - Be^{-ax})$$

bulunur.(8) ve (12) nolu denklemlerde $x=0$ değeri yerine konularak, borunun uç noktasındaki akım ve potansiyel değerleri elde edilir.

$$E_m = A + B$$

$$I = \frac{a}{R} (A - B)$$

Bu iki denklem kullanılarak (A) ve (B) sabitleri hesaplanır. Daha sonra bu değerler denklemde yerine konularak herhangi bir (x) mesafesindeki potansiyel değişimi E bulunur.

$$A = \frac{1}{2} (E_m + \frac{r}{a} I)$$

$$B = \frac{1}{2} \left(E_m - \frac{r}{a} I \right)$$

$$E = E_m \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} \right) + I \frac{r}{R} \left(\frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right)$$

$$E = E_m \cosh(ax) + I \frac{r}{a} \sinh(ax)$$

Borunun toplam uzunluğunun ve akım uygulama noktasında $L=0$ olacaktır. Denklemden bu değerler yerine konursa,

$$E_0 = E_m \cosh(aL)$$

bağıntısı elde edilir. Burada,

E_0 = Akım uygulanan noktadaki boru-zemin potansiyeli değişimi, Volt

E_m = Katodik koruma yapılmış boru parçasının uç noktasındaki minimum potansiyel değişimi, Volt

a = Potansiyel düşüş sabiti, m^{-1}

L = Bir noktadan korunabilen boru parçası uzunluğu, m dir.

Aynı şekilde boruya uygulanan akım şiddeti içinde ,

$$I_0 = \frac{a}{r} E_m \sinh(aL)$$

bağıntısı elde edilir.

Yukarıda matematiksel yollarla elde edilen bağıntılar göz önüne alındığında, bir noktadan korunabilen maksimum boru uzunluğunun (L) yalnızca (a) sabitine bağlı olduğu görülür. Belirli miktardaki bir akım uygulamasında (a) sabiti küçüldükçe (aL) terimi büyüyeceğinden, daha uzun bir boru parçası bir noktadan korunabilir.

(a) sabitinin küçük olması için boru metal direnci r nin mümkün olduğunca küçük, boru kaplama direncinin (R) ise , mümkün olduğunca büyük olması gerekir. (a) sabiti birim uzunluktaki boru parçası için

hesaplanır. Bu amaçla boru metal direnci $r = \text{Ohm.m}$ olarak , kaplama direnci de $R = \text{Ohm.m}$ cinsinden alınırsa (a) katsayısı,

$$a = \sqrt{\frac{\text{Ohm} / m}{\text{Ohm.m}}} = m^{-1}$$

olur,yani bir metre boru başına hesaplanmış olur. (a) sabitinin hesaplanması için borunun uzunluğuna direnci (r) nin bilinmesi gerekir. Bu direnç,

$$r = \rho \frac{L}{S}$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

$r = L$ m uzunluğunda borunun elektriksel direnci, Ohm

$r = \text{Çeliğin özgül elektriksel direnci, } 0,17 \times 10^{-6} \text{ Ohm.m}$

$L = \text{Boru uzunluğu, m}$

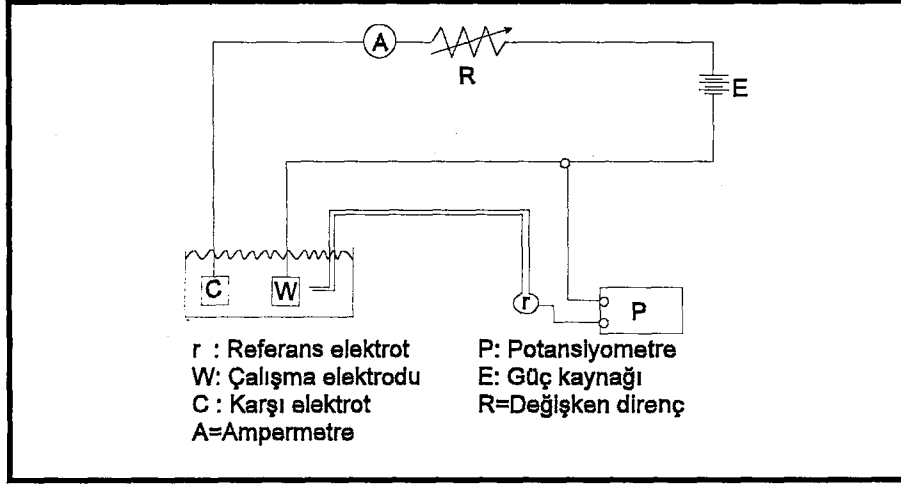
$S = \text{Boru kesit alanı} = \rho D_m(e), m^2$

$D_m = \text{Boru ortalama çapı, m}$

$e = \text{Boru et kalınlığı, m dir}$

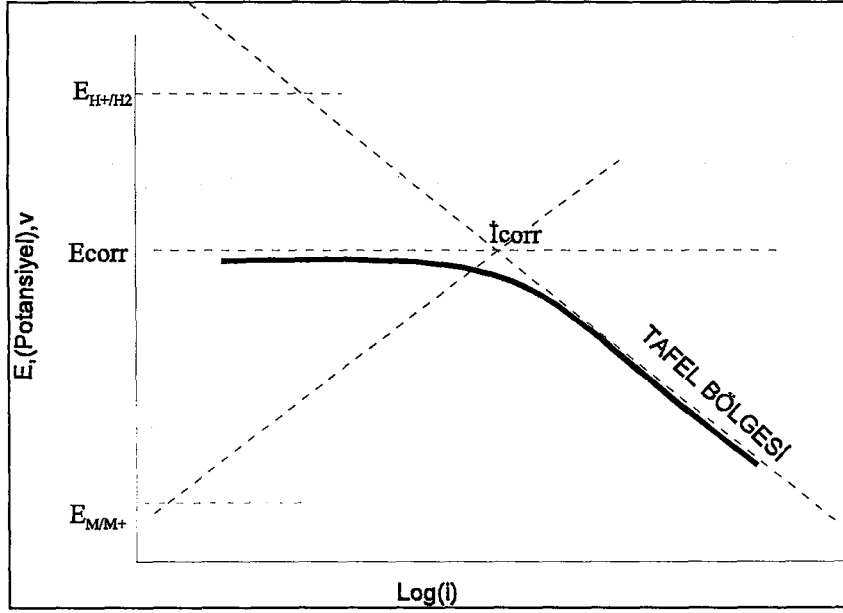
3.6 Polarizasyon - kırılma (Tafel Ekstrapolasyon) yöntemi

Bu yöntem Wagner ve Traud tarafından karma potansiyel teorisine dayanarak ortaya konmuştur. Bu yöntemde anodik ve katodik polarizasyon eğrileri kullanılmaktadır. Daha kolay elde edilmesi bakımından katodik polarizasyon eğrisi tercih edilmektedir. Katodik polarizasyon eğrisinin ölçümü için kurulan devre şeması Şekil .10 'de görülmektedir.



Şekil 10. Polarizasyon kırılma yöntemine göre akım ihtiyacı deney düzeneği

Metale bir yardımcı elektrot ile akım uygulanır. Yardımcı elektrot olarak platin kullanılabilir. Uygulanan akım bir ampermetreden ölçülür. Bu akım altındaki metalin potansiyeli bir referans elektrot yardımıyla ölçülür. Reosta yardımıyla elektroda uygulanan akım değiştirilebilir. Böylece değişik akım ve potansiyel değerlerinde tutulabilen metalin istenen bölge aralığında akım-potansiyel eğrileri çizilebilir. Oksijensiz bir elektrolit içine daldırılan bir metalin katodik polarizasyon Şekil 11 de görüldüğü gibidir.



Şekil 11. Oksijensiz bir elektrolite daldırılan bir metalin katodik polarizasyon eğrisi

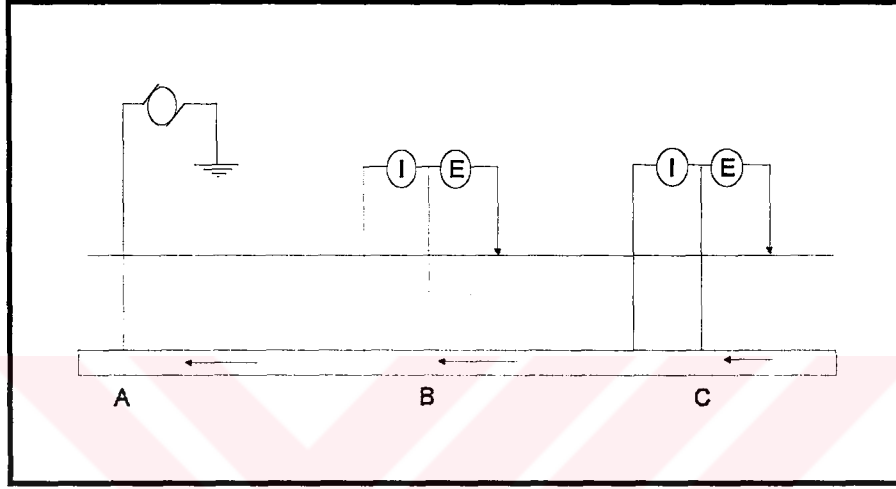
Metale hiç akım uygulanmadığında okunan potansiyel değeri E_{corr} 'dur. Uygulanan akımın logaritmasına karşı elektrodun ölçülen potansiyeli grafiğe geçilirse polarizasyon eğrisi elde edilir. $E - \log i$ eğrisi şekilde görüldüğü gibi $\log i$ değeri belli bir büyüklüğe erişince lineer bir bölge elde edilir. Bu bölge tafel bölgesi olarak bilinir. Uygulanan redüksiyon ve oksidasyon reaksiyonlarına karşı gelen akımların farkına eşittir.

$$i_{katot} = i_{redüksiyon} - i_{oksidasyon}$$

İdeal şartlarda bulunan sistemlerde ekstrapolasyon yöntemi ile bulunan korozyon hızı ağırlık kaybı yöntemi ile bulunan korozyon hızına eşit veya biraz yüksektir. Bu yöntemle anlık korozyon hızı ölçülebilir. Oysa ağırlık kaybı yöntemi ile belli bir süre içindeki ortalama korozyon hızı ölçülmektedir.

3.7 Kaplama direncine göre akım ihtiyacı tesbiti

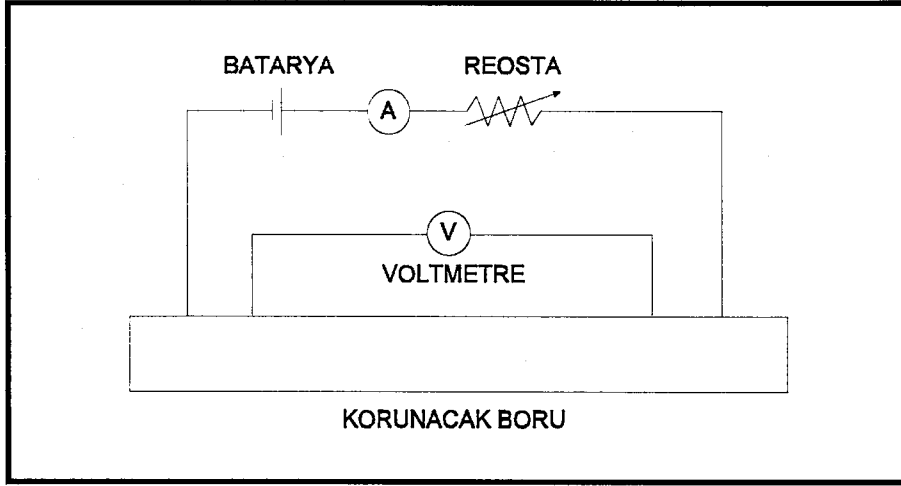
Bu deney, boru üzerinde akan akımın şiddetinin ölçülmesi ilkesine dayanır. Bu amaçla Şekil 12’de görülen deney düzeneği kullanılır.



Şekil 12. Boru kaplama direncinin tayini deneyi devre şeması

Boru hattına bir noktadan (A), yeteri miktarda bir doğru akım uygulanır. Bu akım, ölçü yapılacak noktalarda boru/zemin potansiyelini -0.85 volttan daha negatif yapacak miktarda olmalıdır. Boru hattı üzerinde birbirinden yeteri kadar uzaklıkta iki ölçüm istasyonunu seçilir. (B ve C).

(A) noktasından boru hattına uygulanan akım otomatik olarak 45 saniye akım geçtikten sonra 15 saniye süre ile kesilir. Bu süreler içinde (B) ve (C) noktalarında boru/zemin potansiyeli (on) ve (off) olarak okunur. Diğer taraftan yine aynı noktalarda, borudan geçmekte olan akım şiddeti (on) ve (off) halinde sıfır dirençli bir ampermetre ile Şekil 13’de görülen düzencekle ölçülür.



Şekil 13. Boru üzerinden geçen akımın sıfır iç dirençli ampermetre ile ölçülmesi

BC arasında kalan boru parçasının kaplama direnci şöyle hesaplanır.

- BC arasında uygulanan akım nedeniyle oluşan potansiyel değişimleri;

$$(B) \text{ Noktasında : } E_{on} - E_{off} = DE_B$$

$$(C) \text{ Noktasında : } E_{on} - E_{off} = DE_C$$

BC boyunca boru hattında meydana gelen potansiyel değişimi ortalaması,

$$DE_{ort} = \frac{DE_B + DE_C}{2}$$

- BC arasında borudan geçen akım:

$$(B) \text{ Noktasında : } I_{on} - I_{off} = DI_B$$

$$(C) \text{ Noktasında : } I_{on} - I_{off} = DI_C$$

BC boyunca borudan akan akım şiddeti,

$$I = DI_B - DI_C$$

BC arasındaki boru parçasının kaplama direnci, R,

$$R = \frac{DE_{ort}}{I}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Buradan belli uzunluktaki borunun Ohm olarak toplam kaplama direnci elde edilir.

3.8 Katodik koruma

Dünyada, boru hatları ,depolama tankları, kuyu iç boruları, yapı destekleri , iletişim kabloları ve daha bir çoğu gibi yeraltı metalik yapılara çok büyük yatırımlar yapılmaktadır. Bu metalik yapılar toprakla doğrudan temas halinde olurlarsa ve korunmamışlarsa , korozyona uğrarlar. (Schweitzer,1983)

1824'de Sir Humprey Davy, akır gövdeli savaş gemilerinin çinko anotlarla korunabileceğini açıklamıştır.İngiltere Deniz Kuvvetleri Komutanlığı, katodik koruma yapmak için çinko blokları , bakır-plaka kaplı geminin tekne kısmına tutturdu.Ancak , uygulanan katodik koruma sisteminin gövdeye monte edilen anotlardan dolayı gemilerin hızının yavaşlaması nedeniyle bu uygulamadan vazgeçilmiştir. Ancak, bakırın korozyon hızı görülebilir bir şekilde yavaşlamıştır.

1910-12 yıllarında dış akım kaynaklı katodik korumanın ilk uygulamaları İngiltere ve ABD'de yapılmıştır..O zamandan beri katodik korumanın kullanımı dünya çapında yaygınlaşmıştır. Günümüzde bu uygulamalarla korunan binlerce km gömülü boru ,iskele,tank,gemi ve kablo vardır.

Demir ve çelik yapıların tam olarak korunabilmesi için gerekli olan kriterler şunlardır.

- ñ Metalin her noktasında ölçülen metal-zemin potansiyel değerinin Cu/CuSO_4 referans elektroduna göre -850 mV veya daha negatif olması
- ñ Çelik yapıya uygulanan akımla 15 sn içinde metal-zemin potansiyelinin en az -100 mV düşmesi
- ñ Hiç akım uygulanmadan ölçülmüş olan doğal potansiyeline göre çelik yapının -300 mV katodik yönde polarize edilmesi

Katodik korumanın iki tür uygulama şekli vardır.

1. Dış akım kaynaklı katodik koruma
2. Galvanik anotlu katodik koruma

3.8.1 Dış akım kaynaklı katodik koruma

Bu yöntemin uygulanması için bir doğru akım kaynağı ve yardımcı anot gerekmektedir. Yardımcı anot grafit ,demir , veya son yıllarda geliştirilmiş titanyum bazlı malzemelerden oluşur . Anot ,doğru akım kaynağının pozitif, metal yapı da negatif kutbuna bağlanır.. Dış akım kaynağı yardımıyla sisteme uygulanan akım anot üzerinden çıkarak metal yapıya geçer . Bu sistemde uygulanan akımın büyüklüğü yukarıda belirtilen koruma kriterlerinden birini sağlayacak düzeyde olmalıdır. (Schweitzer,1983)

3.8.2 Galvanik anotlu katodik koruma sistemi

Galvanik seride içinde korunacak metalden daha aktif bir metalin anot olarak kullanılması yöntemidir. Galvanik bir pil , akım yönü doğrultusunda kurulur. Galvanik anot olarak genellikle magnezyum ,alüminyum ,Çinko ve bunların alaşımları kullanılır. Bu anotlar pozitif elektrik kaynağı oldukları

için elektriğin olmadığı veya bu amaç için elektrik enerjisinin elverişsiz yada çok yüksek maliyetli olduğu yerlerde , özellikle uygulanır. (Schweitzer,1983)

3.8.3 Akım ihtiyacı

1 m² yüzeyde yeterli katodik koruma sağlamak için gerekli akıma katodik koruma akım ihtiyacı denir. Bu akımı anot vereceğinden bu bilgilerden gerekli hesaplamalar yapılarak anodun boyutu , tahmin edilen ömrü ve gerekli olan anot sayısı bulunabilir. Daha önce gösterildiği gibi galvanik anot olarak kullanılan en yaygın üç metal magnezyum, çinko ve alüminyumdur. Bu metallerin elektrokimyasal özelliklerinden bazıları aşağıda verilmektedir

Tablo 3. Farklı galvanik anotları akım kapasiteleri

Metal	Teorik akım kapasitesi, A.saat/kg	Anot verimi,%	Pratik akım kapasitesi,A.Saat/kg
Magnezyum	1000	50	500
Çinko	370	90	333
Alüminyum	1345	60	810

4. MATERYAL ve METOT

Üç grup deneysel çalışma yapılmıştır. Bunlardan 1.grup çalışmalar laboratuvar tipi, 2.grup çalışmalar prototip üzerinde , 3.grup çalışmalar ise arazide gerçek boru hattında yapılmıştır. Bu çalışmalarda polarizasyon kırılma yöntemi ve polarizasyon kayması yöntemi uygulanarak katodik koruma akım ihtiyacı ölçülmüştür.

4.1 Laboratuvar Çalışması

4.1.1 Deney malzemeleri

Boru	=	450 mm çapında ve 1 metre boyunda çelik boru
Boru kaplaması	=	6 cm kalınlığında Poliüretan ve üzeri kraft kağıdı kaplı
Anot	=	1,6/50 cm boyutlarında metal oksit kaplı Ti Anot (Matcor marka)
Güç Kaynağı	=	10 Volt 10 Amper kapasitesinde doğru akım kaynağı
Referans Elektrod	=	Cu/CuSO ₄ Referans Elektrot
Ortam Malzemesi	=	600 Ohm.cm dirençli ve pH'ı 6,8 olan toprak
Digital Avometre	=	Plug Marka, 10 Amper Ölçerli
Deney Yeri	=	400 cm boy x 120 cm en x 120 cm yüksekliğinde ağaçtan imal, iç yüzeyi naylon ile kaplanmış deney kabı
Ayarlı Direnç	=	0-2 MOhm arasında sürekli değişebilen direnç
Kablolar	=	1x10 mm ² kesitinde NYY tipi

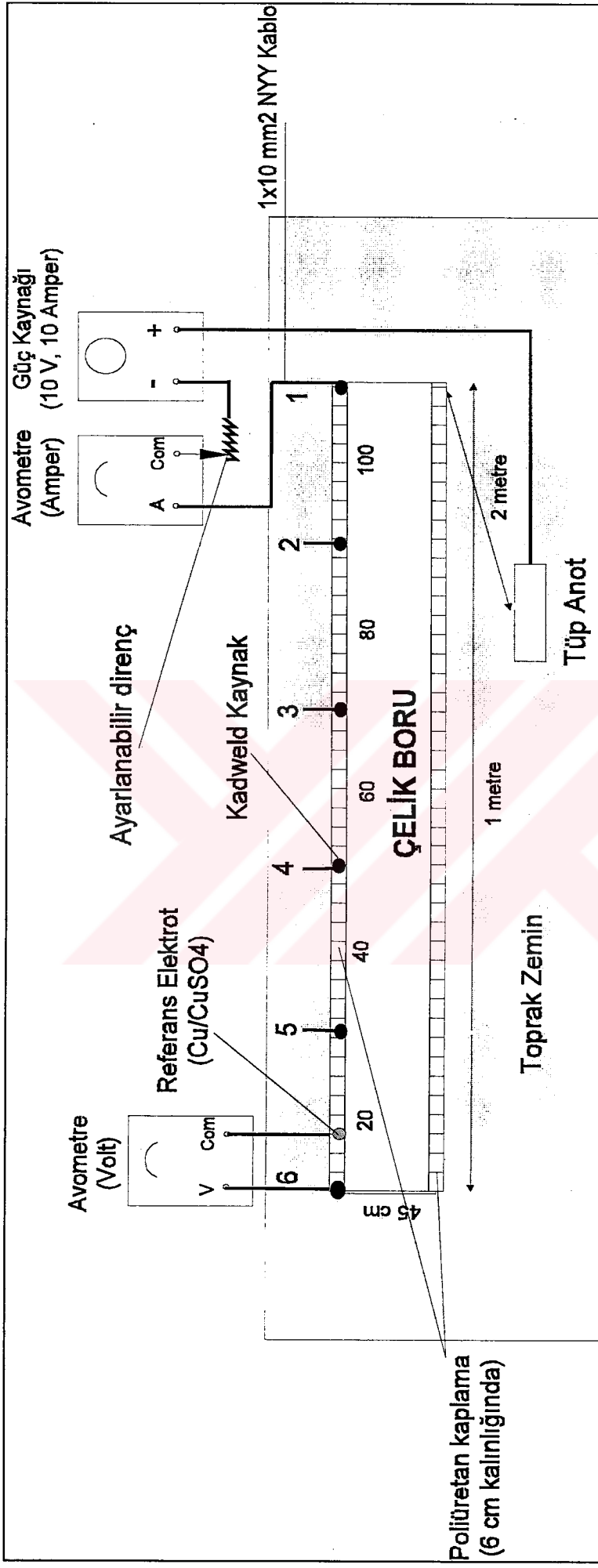
Deneyde kullanılan borunun hazırlanması

Deney de kullanılan boru, normal kullanımda olan 450 mm çapında ve 12 metrelik yekpare borulardan 100 cm boyundaki kısmı kesilerek hazırlanmıştır. Borunun baş ve son kısımları kapatıldıktan sonra , kaplama 6 noktada kablo bağlantısı için 5cmx5cm boyutlarında sökülmüştür. Bu noktalara , 1x10 mm² NYY tipi yeraltı kabloları kadweld kaynak ile bağlanmıştır. Bağlantılar yapıldıktan sonra bu bağlantı noktaları orjinal kaplamaya eşdeğer dirençli poliüretan köpük ile kaplanmıştır.

Boru bu şekilde hazırlandıktan sonra, sahadan alınmış olan zemin toprağı içine yerleştirilmiştir.

4.1.2 Deney sistemi

Çelik boru deney kabına yerleştirildikten sonra Şekil.14 de verilen deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 14. Polarizasyon kırılma yöntemi için şematik deney düzeneği

4.1.3 Deneyin yapılışı

Devre tamamlandıktan sonra Şekil -14 boruya katodik bir akımı uygulanmıştır. Akım değiştirilerek her akıma karşı gelen zemin potansiyel değeri ölçülmüştür.

Koruma devresine uygulanan akım yoğunluğu bulunarak bunun logaritması x eksenine , potansiyeller ise y ekseninde alınarak (E-log i) polarsizasyon eğrisi çizilmiştir. Bu eğride iki lineer bölge mevcuttur. İkinci lineer bölge korozyon potansiyeline ekstrapole edilerek katodik koruma akım ihtiyacı tayin edilir.

4.1.4 Deney verileri

4.1.4.1 Akım-potansiyel değerleri

Polarizasyon kırılma yöntemine göre elde edilen akım-potansiyel değerleri aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 4. Akım-Potansiyel değerleri (Cu/CuSO₄Ref.Elek.göre)

Akım(mA)	Potansiyel (mV)
0.10	-510
0.11	-511
0.12	-511
0.12	-511
0.13	-512
0.15	-512
0.16	-512
0.18	-512
0.20	-513
0.22	-513
0.23	-513
0.25	-513
0.26	-516
0.28	-518
0.31	-521
0.34	-523
0.38	-526
0.41	-552
0.43	-580
0.46	-609
0.48	-639
0.50	-671
0.53	-705
0.55	-740
0.58	-777
0.61	-816
0.64	-856
0.67	-901
0.71	-943
0.74	-992
0.78	-1043

4.1.4.2 Kaplama direnci tayini deneyleri

Polarizasyon kayması yöntemi kullanılarak attenuation sabiti ve kaplama direnci ve akım ihtiyacı değerleri tayin edilmiştir. Bu amaçla yapılan deney sonucu elde edilen veriler aşağıdaki tabloda verilmiştir. Bu deneyde $I=0,63$ mA akım uygulandığı zaman boru/zemin potansiyeli -850 mV değerine gelmiştir.. (Tablo-5)

Tablo 5: Kaplama direnci için E_{on} ve E_{off} Eölçümleri($I=0,65$ mA)

Ölçüm Noktası	E_{on}, mV	E_{off}, mV	$E_{on} - E_{off}, mV$
1	-860	-830	-30
2	-860	-830	-30
3	-859	-827	-32
4	-859	-828	-31
5	-858	-826	-32
6	-858	-826	-32

4.2 Arazi Prototip Deneyleri

4.2.1 Deney malzemeleri

Boru	=	450 mm ϕ ında ve 50 metre boyunda ϕ elik boru
Boru kaplaması	=	6 cm kalınlıkta Poliüretan kaplama ϕ zeri kraft kağıdı kaplama
Anot	=	1,6/50 cm boyutlarında metal oksit kaplı Ti Anot (Matcor marka)
Güç Kaynağı	=	10 Volt 10Amper kapasitesinde doğru akım kaynağı
Referans Elektrod	=	Cu/CuSO ₄ Referans Elektrot
Ortam Malzemesi	=	620 Ohm.cm dirençli ve pH'ı 6,8 olan toprak
Digital Avometre	=	Plug Marka, 10 Amper Ölçerli
Deney Yeri	=	Boru hattı güzergahı ϕ zerinde 50 metre boyunda x 1.6 metre eninde ve 2 metre derinliğinde kanal (Afyon Merkez İsmailköy trafo önü)
Ayarlı Direnç	=	0-2 Mohm arasında sürekli değişebilen direnç
Jeneratör	=	1 KW gücünde jeneratör
Kablolar ve kısıkaçlar	=	1x10 mm ² kesitinde NYY tipi
Arazi tipi pH metre	=	Cole Parmer Marka

Deneyde kullanılan borunun hazırlanması

Deneyde kullanılan boru normal kullanımda olan 450 mm çapında ve 12 metrelik yekpare borulardan 50 metreyi sağlayacak şekilde 5.5 adet kaynak edilerek hazırlanmıştır. Boru üzerine akım drenaj ve son noktasına $1 \times 10 \text{ mm}^2$ NYY tipi yeraltı kabloları kadweld kaynak ile bağlanmıştır. Bağlantılar yapıldıktan sonra bu bağlantı noktaları ve boru ek yerleri orjinal kaplamaya eşdeğer dirençte poliüretan köpük ile kaplanmıştır.

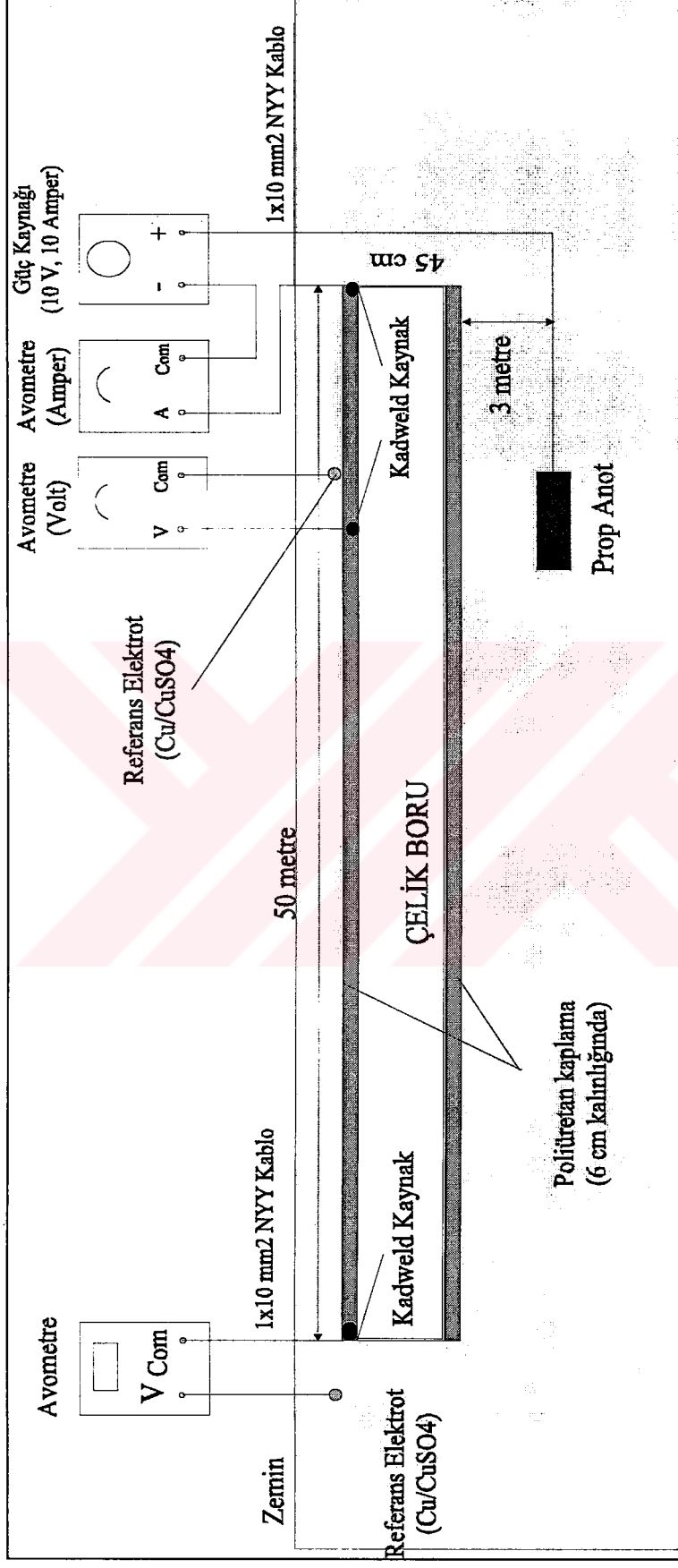
Boru deneye hazırlandıktan sonra, hazırlanmış olan kanal içine konulmuş ve üstü kapatılmıştır.

4.2.2 Zemin

Deneyde doğal zemin kullanılmış ve bu zeminin öz direnci Wenner dört nokta yöntemi ile ölçülmüş ve 620 Ohm.cm olarak bulunmuştur. Toprak %10 oranında rutubetli bulunmuştur.

4.2.3 Deney Sistemi

Çelik boru , referans elektrod ve diğer ölçü cihazları Şekil-15 te görüldüğü gibi bağlanarak deney sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 15. Polarizasyon kırılma yöntemine göre arazide prototip boyutta kurulmuş olan deney düzeniği

4.2.4 Deneyin yapılışı

Şekil-15 de görüldüğü gibi hazırlanmış olan deney düzeneği de boru hattına, yaklaşık 6 saat süreyle geçici olarak dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi uygulanmıştır. Bu deney sırasında akım enjekte noktasında ve 50 metre sonraki boru ucunda Cu/CuSO₄ referans elektroda göre boru zemin potansiyeli ölçülmüştür. Alınan ölçümler Tablo 6 de verilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen grafiklerden polarizasyon kırılma yöntemiyle katodik koruma akım ihtiyacı tesbit edilmiştir.



4.2.5 Akım potansiyel değerleri

Deneyde elde edilen akım -potansiyel değerleri Tablo-6 de verilmektedir.

Tablo 6. Akım potansiyel deney verileri

Uygulanan Dış Akım (mA)	Boru Potansiyeli(mV)
1.0	-560.0
5.0	-560.0
5.4	-565.0
5.9	-565.0
6.4	-593.3
7.0	-622.9
7.6	-670.0
8.3	-703.5
9.0	-738.7
9.8	-775.6
10.6	-814.4
11.6	-855.1
12.6	-897.9
13.7	-942.8
14.9	-989.9
16.2	-1039.4
17.6	-1091.4
19.2	-1145.9
20.8	-1203.2
22.7	-1263.4
24.7	-1326.6
26.8	-1392.9
29.2	-1462.5
31.7	-1535.7
34.5	-1612.4
37.5	-1693.1
40.8	-1777.7
44.4	-1866.6
48.3	-1959.9
52.5	-2057.9
57.1	-2160.8
62.1	-2268.9
67.5	-2382.3
73.4	-2501.4
79.9	-2626.5
86.9	-2757.8
94.5	-2895.7
102.8	-3040.5

4.3 Arazi(Uygulama) Deneyleri

Arazi (uygulama) deneyleri gerçek boru hattı üzerinde yapılmış olup, zemin, boru ve kaplama özellikleri aşağıda verilmiştir.

4.3.1 Zemin özellikleri

Afyon şehrinin, bölgede yeralan Jeotermal enerji ile ısıtılmasını sağlamak için, Jeotermal suyun bulunduğu kuyulardan şehir içindeki bir kuvvet santraline 2 adet boru çekilmiştir. Kuvvet santralinden de konutlara kadar çeşitli çaplarda paralel ikili boru sistemi çekilmiştir. Bu borulara dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi uygulanmıştır.

Jeotermal kuyularla kuvvet santrali arasında bulunan 14,4 km lik boru hattı güzergahı boru zemini olarak alınmış ve bu zeminde aşağıdaki ölçümler yapılmıştır.

Boru güzergahı boyunca yaklaşık eşit aralıklarla 21 noktada zemin öz direnci ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde elektrod açıklığı 200 cm alınmış ve TS-4363 'e uygun olarak Wenner Dört Nokta Yöntemi uygulanmıştır. Ölçümler Tablo 7 verilmiştir.

Tablo 7. Boru hattı zemininin öz direnç değerleri

Rezistivite ölçüm noktası	Rezistivite, Ohm.cm
1	3140
2	1633
3	11555
4	1758
5	377
6	628
7	1130
8	1884
9	1017
10	5024
11	1130
12	3831
13	20724
14	2638
15	1407
16	3140
17	2324
18	5652
19	8918
20	4396
21	1884

4.3.2 Boru ve kaplama özellikleri

Kuyularla kuvvet santrali arasında biri sıcak su geliş hattı diğeri soğuk su (sıcak su dönüş) hattı olmak üzere paralel giden 2 adet boru hattı fiziksel özellikleri Tablo-8 de verilmektedir.

Tablo 8. Boruların fiziksel özellikleri

	Sıcak Su Borusu	Soğuk Su Borusu
Boru Çapı (mm)	450	450
Boru et kalınlığı(mm)	6.3	6.3
Boru boyu ,(km)	14.400	14.400
Kaplama	Poliüretan	Bitüm

Katodik koruma uygulamasında anot yatağı boru hattına dik konumlu ve yatay anot yatağı yapılmıştır. Ayrıca interferans etkilerini minimuma indirmek için bitüm kaplı borularda 27 noktada 17 lb Mg anot bağlanmıştır.Boru hattı IF(İzole flanş) larla diğer metalik yapılardan ayrılmıştır. İki noktada yabancı borularla kesim noktası vardır. 9 noktada ENH kesimi mevcut olup, bu noktalarda da kaçak akımlar için drenaj elektrodları kullanılmıştır.

4.3.3 Uygulama özellikleri

14.400 metre uzunluğunda iki paralel borunun bir noktadan korunmasında 20 A ,40 V kapasiteli bir T/R ünitesi ve 16 adet 23 kg lık Fe-Si anot kullanılmıştır.

Burada önemli husus, yüzey kaplaması birbirinden çok farklı olan iki borunun birbirine çok yakın döşenmiş bulunması ve birlikte korunmasıdır. Borular arasındaki interferansı en aza indirmek için bitüm kaplı borunun potansiyeline yükseltici bir yöntem uygulanmıştır. Bunun için 27 adet 17 lb Magnezyum Anot bitüm kaplı boruya direkt olarak bağlanmış ve anotlar iki boru arasına monte edilmiştir. Bu anotlar boruya bağlı durumda iken yapılan ölçümlerde her iki borunda doğal potansiyelleri birbirine yaklaşmıştır. Bu koşullar hazırlandıktan sonra farklı kaplamalı iki boru tek bir boru hattı gibi değerlendirilip uygulamaya geçilmiştir.

4.3.4 Uygulama değerleri

Boru hattı katodik koruma sistemi devreye alındıktan sonra 6 ay süreyle 28 noktada boru/zemin potansiyeli değerleri ölçülmüştür. Ayrıca aynı noktalarda katodik koruma sistemi işletmeye alınmadan borunun doğal boru/zemin potansiyeli ve sistemin tamamen dengeye gelmesi , borunun yeteri kadar polarize olmasından sonra potansiyel kayması yöntemi ile kaplama direnci ve akım ihtiyacı deneyleri yapılmıştır. 8 ay süre ile boru hattından alınan ölçüm değerleri Tablo-9 ile Tablo-17 arasındaki tablolarda verilmektedir.

Tablo 9. Boru hattına katodik koruma uygulanmadan önceki doğal boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Montajsız
Ölçüm Süresi	1.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-438	-496
STP-2	-442	-435
STP-3	-549	-557
STP-4	-553	-559
STP-5	-562	-568
ETP-6	-581	-598
STP-7	-440	-448
STP-8	-533	-543
STP-9	-490	-400
ETP-10	-500	-410
STP-11	-541	-548
STP-12	-483	-507
STP-13	-449	-520
STP-14	-503	-526
STP-15	-557	-531
STP-16	-516	-546
STP-17	-513	-536
STP-18	-490	-519
STP-19	-476	-498
STP-20	-451	-515
STP-21	-413	-478
STP-22	-426	-503
STP-23	-419	-519
STP-24	-410	-548
STP-25	-466	-460
STP-26	-498	-503
STP-27	-501	-507
STP-28	-463	-519

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 10. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	2.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli, mV
STP-1	-664	-693
STP-2	-659	-662
STP-3	-715	-724
STP-4	-710	-712
STP-5	-702	-704
ETP-6	-711	-720
STP-7	-632	-637
STP-8	-672	-679
STP-9	-653	-608
ETP-10	-651	-605
STP-11	-673	-679
STP-12	-638	-651
STP-13	-617	-651
STP-14	-642	-655
STP-15	-671	-654
STP-16	-654	-667
STP-17	-655	-663
STP-18	-658	-673
STP-19	-653	-665
STP-20	-621	-654
STP-21	-594	-627
STP-22	-591	-632
STP-23	-582	-635
STP-24	-570	-639
STP-25	-599	-595
STP-26	-611	-614
STP-27	-615	-619
STP-28	-640	-627

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 11. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	3.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli, mV
STP-1	-889	-889
STP-2	-876	-888
STP-3	-880	-890
STP-4	-867	-865
STP-5	-842	-839
ETP-6	-840	-842
STP-7	-824	-826
STP-8	-811	-815
STP-9	-815	-816
ETP-10	-802	-800
STP-11	-805	-809
STP-12	-792	-795
STP-13	-784	-782
STP-14	-833	-820
STP-15	-785	-776
STP-16	-792	-788
STP-17	-796	-789
STP-18	-825	-826
STP-19	-830	-832
STP-20	-790	-793
STP-21	-775	-776
STP-22	-756	-760
STP-23	-745	-750
STP-24	-730	-729
STP-25	-731	-730
STP-26	-723	-724
STP-27	-729	-730
STP-28	-817	-818

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 12. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	4.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-948	-949
STP-2	-1022	-1031
STP-3	-1013	-1023
STP-4	-999	-996
STP-5	-990	-987
ETP-6	-973	-901
STP-7	-897	-896
STP-8	-896	-896
STP-9	-907	-903
ETP-10	-914	-905
STP-11	-882	-729
STP-12	-821	-823
STP-13	-871	-869
STP-14	-893	-879
STP-15	-873	-872
STP-16	-880	-873
STP-17	-887	-883
STP-18	-903	-903
STP-19	-901	-902
STP-20	-855	-858
STP-21	-828	-829
STP-22	-820	-823
STP-23	-816	-818
STP-24	-838	-845
STP-25	-849	-850
STP-26	-850	-850
STP-27	-832	-830
STP-28	-888	-889

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 13. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	5.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-1038	-1040
STP-2	-1167	-1173
STP-3	-1146	-1156
STP-4	-1130	-1126
STP-5	-1138	-1135
ETP-6	-1106	-960
STP-7	-970	-965
STP-8	-980	-976
STP-9	-998	-990
ETP-10	-1025	-1009
STP-11	-958	-649
STP-12	-850	-850
STP-13	-958	-955
STP-14	-953	-973
STP-15	-960	-968
STP-16	-968	-958
STP-17	-978	-976
STP-18	-980	-980
STP-19	-971	-972
STP-20	-920	-922
STP-21	-880	-882
STP-22	-884	-886
STP-23	-886	-886
STP-24	-945	-960
STP-25	-967	-969
STP-26	-976	-975
STP-27	-934	-930
STP-28	-958	-930

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 14. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	6.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-1098	-1100
STP-2	-1184	-1185
STP-3	-1168	-1172
STP-4	-1130	-1106
STP-5	-1138	-1041
ETP-6	-1115	-970
STP-7	-1040	-1031
STP-8	-995	-1028
STP-9	-1002	-1029
ETP-10	-1051	-990
STP-11	-978	-842
STP-12	-860	-945
STP-13	-967	-983
STP-14	-1013	-976
STP-15	-1004	-973
STP-16	-992	-969
STP-17	-1001	-982
STP-18	-1008	-982
STP-19	-1016	-985
STP-20	-958	-921
STP-21	-933	-911
STP-22	-915	-908
STP-23	-916	-916
STP-24	-935	-953
STP-25	-944	-945
STP-26	-953	-956
STP-27	-946	-929
STP-28	-1003	-1004

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 15. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	7.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-1128	-1200
STP-2	-1200	-1196
STP-3	-1190	-1187
STP-4	-1130	-1085
STP-5	-1138	-946
ETP-6	-1124	-980
STP-7	-1100	-1097
STP-8	-1010	-1080
STP-9	-1005	-1067
ETP-10	-1076	-970
STP-11	-998	-1035
STP-12	-870	-1039
STP-13	-975	-1010
STP-14	-1040	-978
STP-15	-1048	-978
STP-16	-1015	-980
STP-17	-1024	-987
STP-18	-1036	-984
STP-19	-1060	-998
STP-20	-996	-920
STP-21	-973	-940
STP-22	-946	-929
STP-23	-946	-946
STP-24	-925	-945
STP-25	-920	-921
STP-26	-930	-936
STP-27	-958	-928
STP-28	-1033	-1030

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkesi noktasındadır

Tablo 16. Katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışıyor
Ölçüm Süresi	8.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-1139	-1125
STP-2	-1210	1234
STP-3	-1200	1223
STP-4	-1115	-1210
STP-5	-1096	-1136
ETP-6	-1132	-1132
STP-7	-1090	-1126
STP-8	-998	-987
STP-9	-952	-958
ETP-10	-972	-981
STP-11	-1020	-1029
STP-12	-982	-987
STP-13	-912	-916
STP-14	-1043	-990
STP-15	-966	-968
STP-16	-972	-970
STP-17	-942	-948
STP-18	-944	-947
STP-19	-962	-967
STP-20	-980	-886
STP-21	-984	-942
STP-22	-913	-916
STP-23	-908	-907
STP-24	-901	-903
STP-25	-900	-910
STP-26	-888	-890
STP-27	-898	-902
STP-28	-1043	-1042

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablo 17. Katodik koruma sistemi devrede dışı iken alınmış olan ölçümler boru/zemin potansiyelleri

T/R Durumu	Çalışmıyor
Ölçüm Süresi	8.Ay

Ölçü Kutu No	Sıcak Su Hattı Potansiyeli,mV	Soğuk Su Hattı Potansiyeli,mV
STP-1	-622	-682
STP-2	-670	-666
STP-3	-843	-834
STP-4	-842	-858
STP-5	-854	-855
ETP-6	-796	-794
STP-7	-792	-794
STP-8	-576	-719
STP-9	-723	-725
ETP-10	-696	-697
STP-11	-704	-706
STP-12	-719	-720
STP-13	-685	-687
STP-14	-709	-708
STP-15	-713	-712
STP-16	-736	-737
STP-17	-829	-828
STP-18	-784	-784
STP-19	-762	-763
STP-20	-874	-875
STP-21	-812	-813
STP-22	-822	-821
STP-23	-776	-775
STP-24	-844	-844
STP-25	-830	-831
STP-26	-845	-846
STP-27	-837	-840
STP-28	-812	-810

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

5.1 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

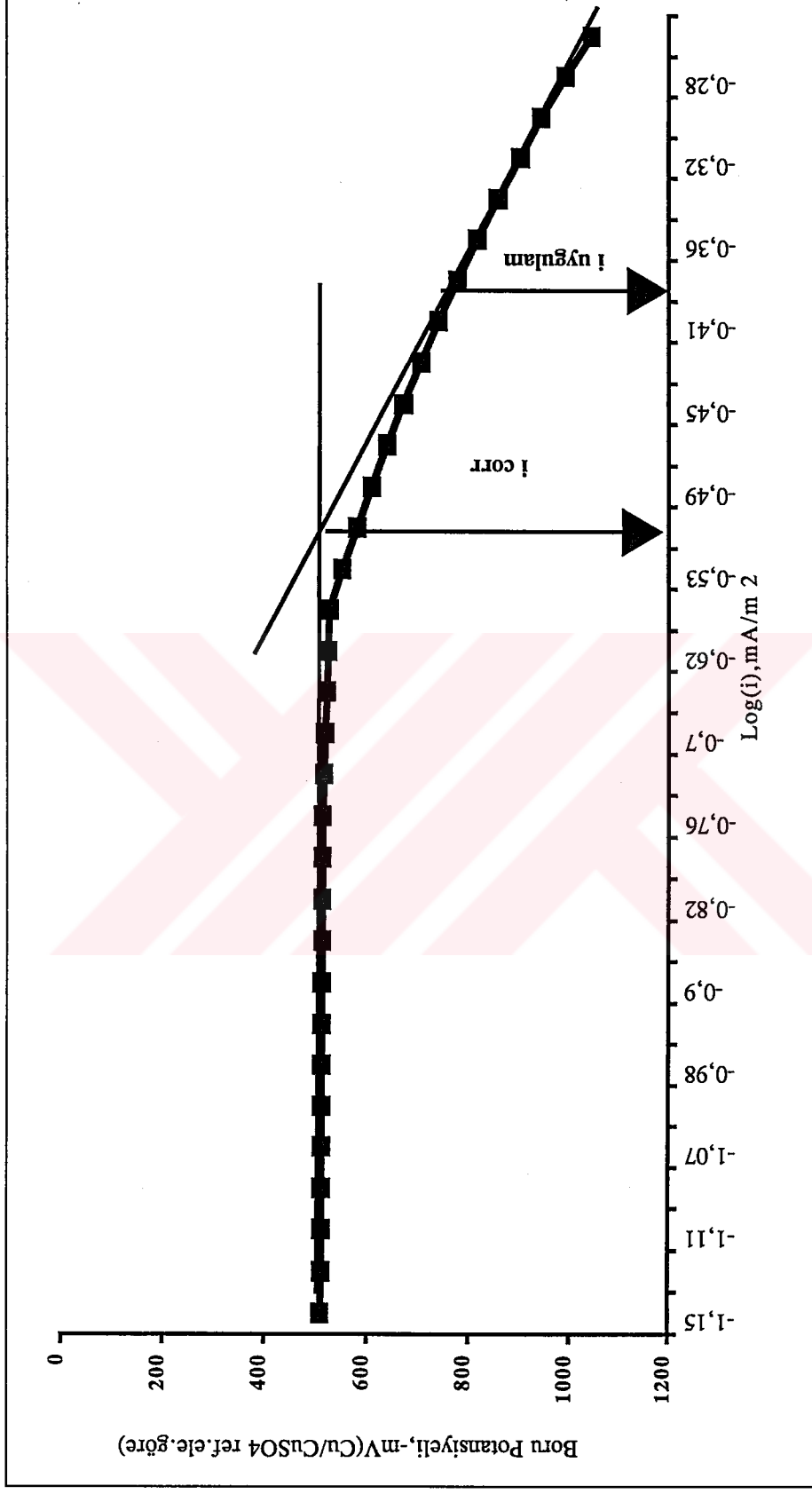
5.1.1 Laboratuvar çalışması sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi

Laboratuvar çalışmalarında elde edilen veriler Tablo-19 da verilmektedir. Polarizasyon kırılma yöntemi ile bu veriler kullanılarak akım ihtiyacının hesaplanabilmesi için akım yoğunluğunun logaritmasına karşılık potansiyel değişiminin grafiği çizilmelidir. Bu grafik için gerekli log i - potansiyel değerleri Tablo-18 da verilmektedir. Bu tablodaki değerlerin grafiksel incelenmesi ise Şekil- 16 da verilmektedir. Şekil-16 da verilen log(i) potansiyel eğrisinin lineer bölgelerinin ekstrapolasyonu ile $i_{\text{corr}} = .0.31 \text{ mA/m}^2$ ve katodik koruma için uygulama akım yoğunluğu $i_{\text{uy}} = 0.41 \text{ mA/m}^2$ bulunmuştur.

Tablo 18: Polarizasyon kırılma yöntemi için laboratuvarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar

Akım Yoğunluğu i mA/m ²	Log(mA/m ²)	Boru Zemin Potansiyeli(mV)
0.07	-1.15	- 510
0.07	-1.15	- 510
0.07	-1.13	- 511
0.08	-1.11	- 511
0.08	-1.09	- 511
0.09	-1.07	- 511
0.09	-1.02	- 512
0.10	-0.98	- 512
0.11	-0.94	- 512
0.13	-0.90	- 512
0.14	-0.86	- 513
0.15	-0.82	- 513
0.16	-0.79	- 513
0.17	-0.76	- 513
0.19	-0.73	- 516
0.20	-0.70	- 518
0.22	-0.66	- 521
0.24	-0.62	- 523
0.27	-0.58	- 526
0.29	-0.53	- 552
0.31	-0.51	- 580
0.32	-0.49	- 609
0.34	-0.47	- 639
0.36	-0.45	- 671
0.37	-0.43	- 705
0.39	-0.41	- 740
0.41	-0.39	- 777
0.43	-0.36	- 816
0.45	-0.34	- 856
0.48	-0.32	- 901
0.50	-0.30	- 943
0.53	-0.28	- 992
0.55	-0.26	- 1,043

Boru yüzey alanı, $(1 \times 3.14 \times 0.45 = 1.413 \text{ m}^2)$



Şekil 16. Laboratuvarda yapılan polarizasyon kırılma deney sonuçlarının Potansiyel-Log(i) grafiği

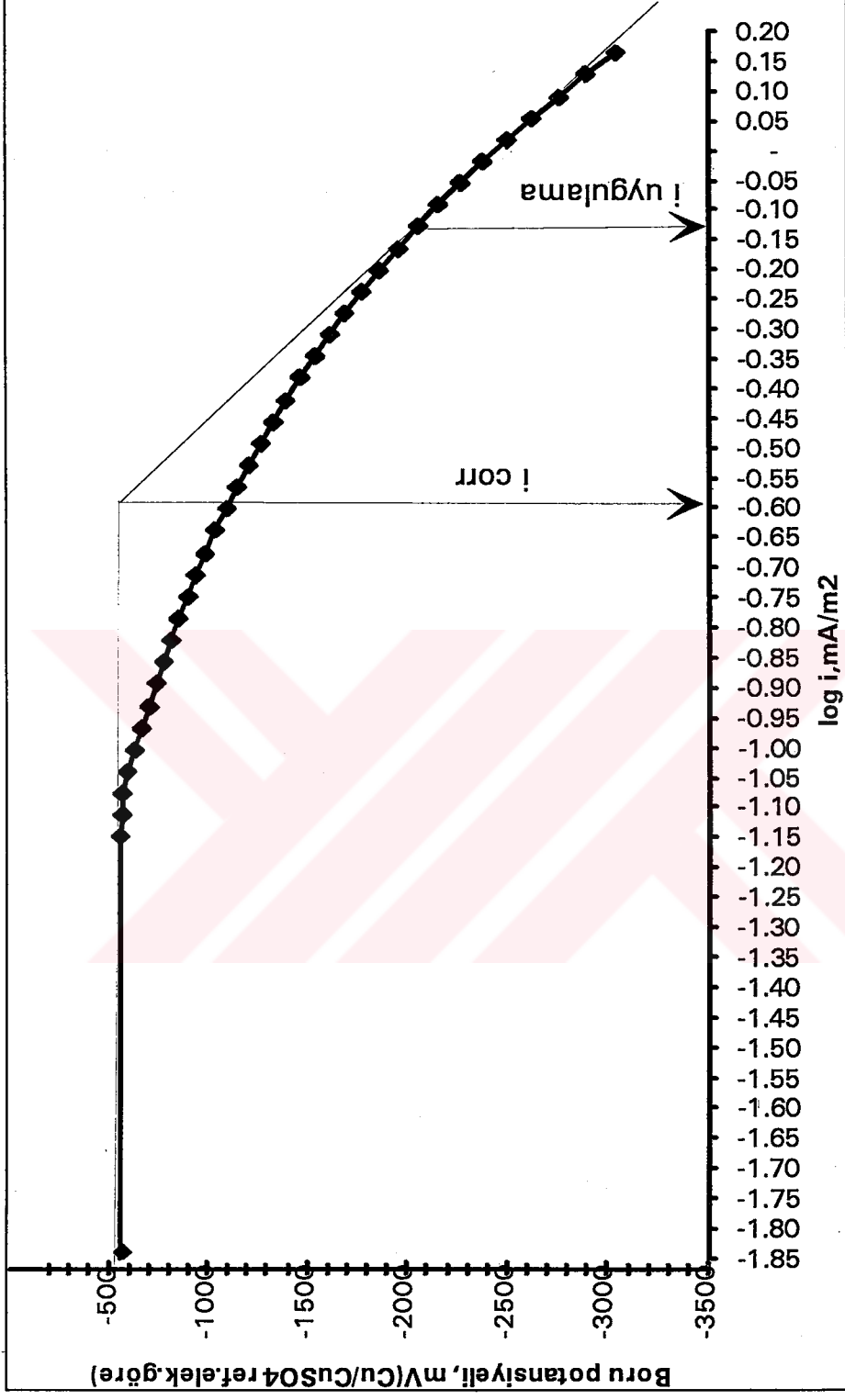
5.1.2 Prototip model çalışması sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi

Prototip model çalışmalarında elde edilen veriler Tablo-20 da verilmektedir. Bu veriler kullanılarak polarizasyon kırılma yöntemi ile akım ihtiyacının hesaplanabilmesi için akım yoğunluğunun logaritmasına karşılık potansiyel değişiminin grafiği çizilmelidir. Bu grafik için gerekli log i - potansiyel değerleri Tablo-19 da verilmektedir. Bu tablodaki değerlerin grafiksel incelenmesi ise Şekil- 17da verilmektedir. Şekil-17 da verilen log(i) potansiyel eğrisinin lineer bölgelerinin ekstrapolasyonu ile $i_{corr} = 0.27 \text{ mA/m}^2$ ve katodik koruma için uygulama akım yoğunluğu $i_{uy} = 0.70 \text{ mA/m}^2$ bulunmuştur.

Tablo 19: Polarizasyon kırılma yöntemi için arazide yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar

Akım Yoğunluğu (mA/m ²)	log i(mA/m ²)	Boru-Zemin Potansiyeli,(mV)
0.014	-1.849	-560
0.071	-1.150	-560
0.077	-1.114	-565
0.084	-1.077	-565
0.091	-1.041	-593
0.099	-1.004	-623
0.108	-0.968	-670
0.117	-0.931	-704
0.127	-0.895	-739
0.139	-0.858	-776
0.151	-0.822	-814
0.164	-0.785	-855
0.178	-0.749	-898
0.194	-0.713	-943
0.211	-0.676	-990
0.229	-0.640	-1039
0.249	-0.603	-1091
0.271	-0.567	-1146
0.295	-0.530	-1203
0.321	-0.494	-1263
0.349	-0.457	-1327
0.380	-0.421	-1393
0.413	-0.384	-1463
0.449	-0.348	-1536
0.488	-0.311	-1612
0.531	-0.275	-1693
0.578	-0.238	-1778
0.628	-0.202	-1867
0.683	-0.165	-1960
0.743	-0.129	-2058
0.808	-0.093	-2161
0.879	-0.056	-2269
0.956	-0.020	-2382
1.040	0.017	-2501
1.131	0.053	-2626
1.230	0.090	-2758
1.337	0.126	-2896
1.455	0.163	-3040

Boru yüzey alanı, $(50 \times 3.14 \times 0.45 = 70,65 \text{ m}^2)$



17 2. Arazide yapılan polarizasyon kırılma deney sonuçlarının Potansiyel-Log(i) grafiği

5.1.3 Uygulama deneyleri sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi

14.4 km uzunluğunda paralel iki boru hattında 8 ay süreyle alınan ölçümler Tablo-9 ile Tablo-17 arasındaki tablolarda verilmektedir. Bu ölçüm değerleri incelendiğinde görölmektedir ki 8 aylık polarizasyon sonunda boru hattının başlangıç noktasında -1139 mV luk bir potansiyel uygulandığında hattın son noktasında -898 mV luk bir potansiyel elde edilmekte ve sistemde yeterli koruma kriteri elde edilmektedir.

Uygulama deneylerinde elde edilen boru/zemin potansiyeli değerleri toplu olarak Tablo-20 de verilmektedir.

Tablo 20. Uygulama deneylerinde elde edilen boru/zemin potansiyeli değerleri

	Doğal Potansiyel mV	P/S ,mV	P/S ,mV	P/S ,mV	P/S ,mV	P/S ,mV	P/S ,mV	E _{on} P/S,mV	E _{off} P/S,mV
Tarih	1.Ay	2.Ay	3.Ay	4.Ay	5.Ay	6.Ay	7.Ay	8.Ay	8.Ay
Ö.K.No									
STP-1	-438	- 664	-889	-948	-1038	-1098	-1128	-1139	-622
STP-2	-442	-659	-876	-1022	-1167	-1184	-1200	-1210	-670
STP-3	-549	-715	-880	-1013	-1146	-1168	-1190	-1200	-843
STP-4	-553	-710	-867	-999	-1130	-1130	-1130	-1115	-842
STP-5	-562	-702	-842	-990	-1138	-1138	-1138	-1096	-854
ETP-6	-581	-711	-840	-973	-1106	-1115	-1124	-1132	-796
STP-7	-440	-632	-824	-897	-970	-1040	-1100	-1090	-792
STP-8	-533	-672	-811	-896	-980	-995	-1010	-998	-576
STP-9	-490	-653	-815	-907	-998	-1002	-1005	-952	-723
ETP-10	-500	-651	-802	-914	-1025	-1051	-1076	-972	-696
STP-11	-541	-673	-805	-882	-958	-978	-998	-1020	-704
STP-12	-483	-638	-792	-821	-850	-860	-870	-982	-719
STP-13	-449	-617	-784	-871	-958	-967	-975	-912	-685
STP-14	-503	-642	-833	-893	-953	-1013	-1040	-1043	-709
STP-15	-557	-671	-785	-873	-960	-1004	-1048	-966	-713
STP-16	-516	-654	-792	-880	-968	-992	-1015	-972	-736
STP-17	-513	-655	-796	-887	-978	-1001	-1024	-942	-829
STP-18	-490	-658	-825	-903	-980	-1008	-1036	-944	-784
STP-19	-476	-653	-830	-901	-971	-1016	-1060	-962	-762
STP-20	-451	-621	-790	-855	-920	-958	-996	-980	-874
STP-21	-413	-594	-775	-828	-880	-933	-973	-984	-812
STP-22	-426	-591	-756	-820	-884	-915	-946	-913	-822
STP-23	-419	-582	-745	-816	-886	-916	-946	-908	-776
STP-24	-410	-570	-730	-838	-945	-935	-925	-901	-844
STP-25	-466	-599	-731	-849	-967	-944	-920	-900	-830
STP-26	-498	-611	-723	-850	-976	-953	-930	-888	-845
STP-27	-501	-615	-729	-832	-934	-946	-958	-898	-837
STP-28	-463	-640	-817	-888	-958	-1003	-1033	-1043	-812

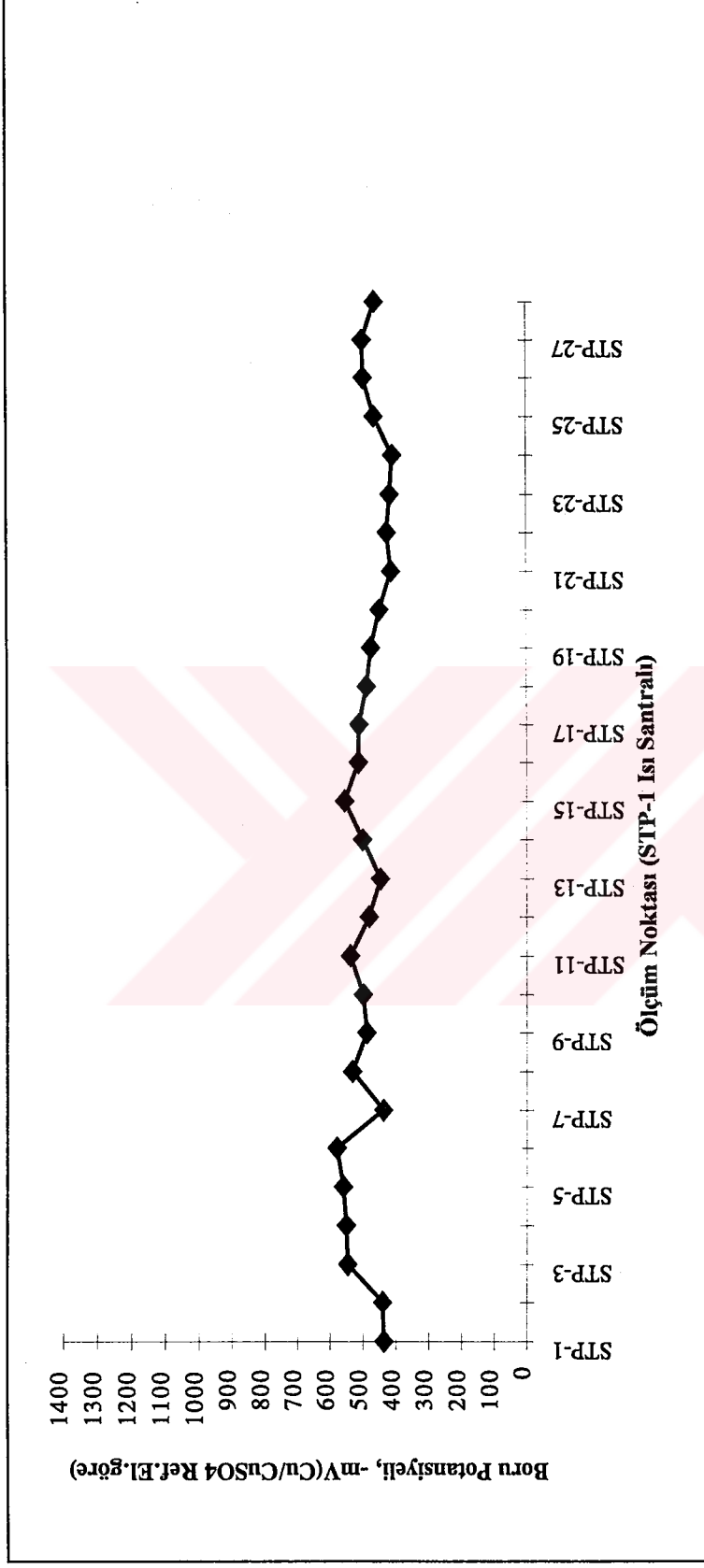
P/S : Boru zemin potansiyeli, mV. Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkezi noktasındadır

Tablolarda verilen uygulama boru/zemin potansiyeli değerlerinin grafiksel incelenmesi Şekil-18 ile Şekil-26 da verilmektedir. Boru zemin potansiyelleri değişimi değerlerinin toplu grafiği de Şekil-27 de verilmektedir.

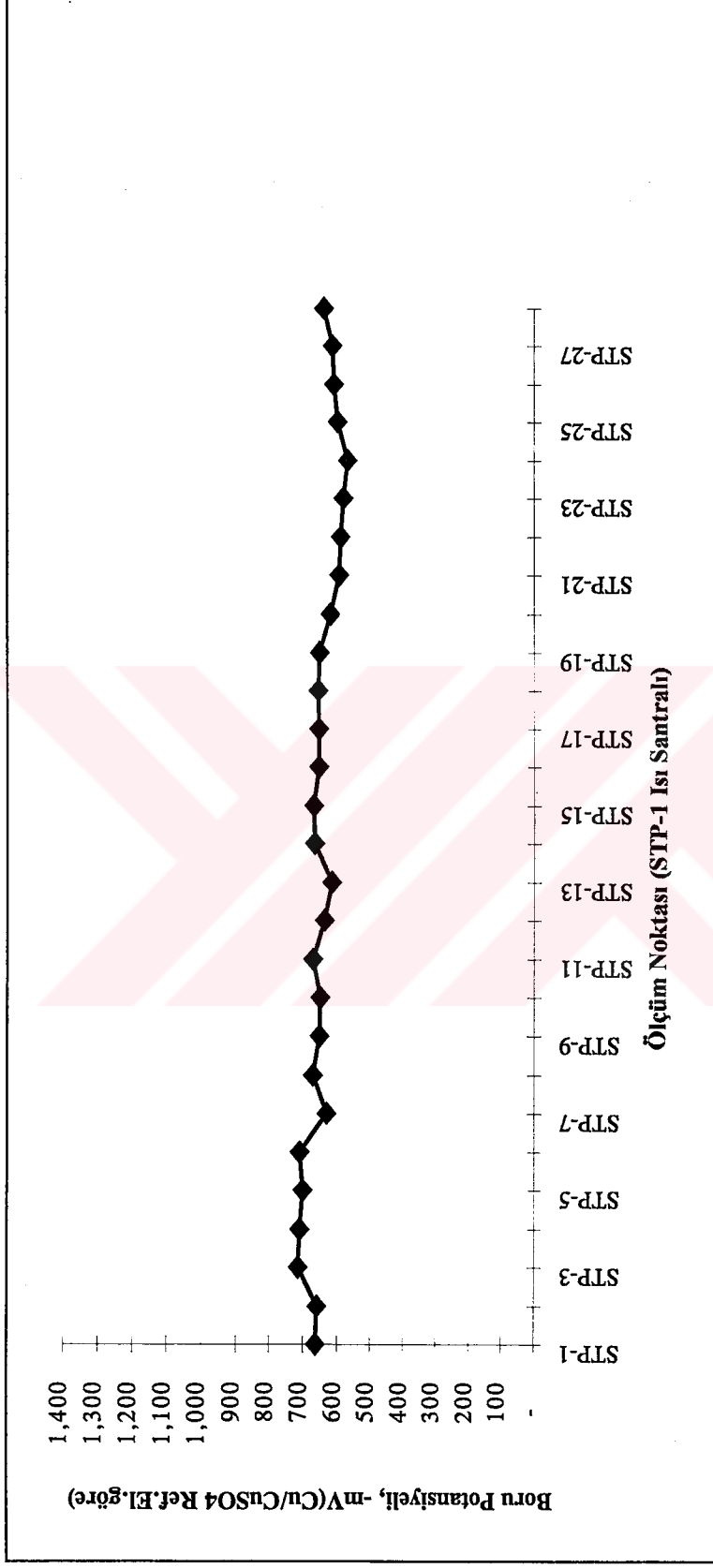
Bu grafikler incelendiğinde hiç akım uygulanmadan ölçülen boruların potansiyelinin zemin özelliklerine bağlı olarak farklı değerler gösterdiği görülmektedir. 1.Aydan tarihinden itibaren boruya katodik koruma uygulandıktan sonra elde edilen boru/zemin potansiyeli değerleri değişimleri

incelendiğinde borunun zamanla polarize olduğu ve zemin etkisinden gelen farklı değerlerin giderek azaldığı görölmektedir. Bu grafiklerde STP-8 ve STP-12 ölçüm noktaları civarında ölçölen boru/zemin potansiyeli değerlerinin beklenenden daha küçük (daha pozitif) olduğu görölmektedir. Bunun nedeni araştırıldığında bu noktalardan STP-8 yakınında NATO^ya ait bir akaryakıt borusunun geçtiğı ve yine STP-12 ile STP-13 arasında bir çelik su boru hattının geçtiğı tesbit edilmiştir. Böylece bu farklılığın bu borular ile korunan boru arasındaki interferans etkisinden oluştuğı anlaşılmıştır.

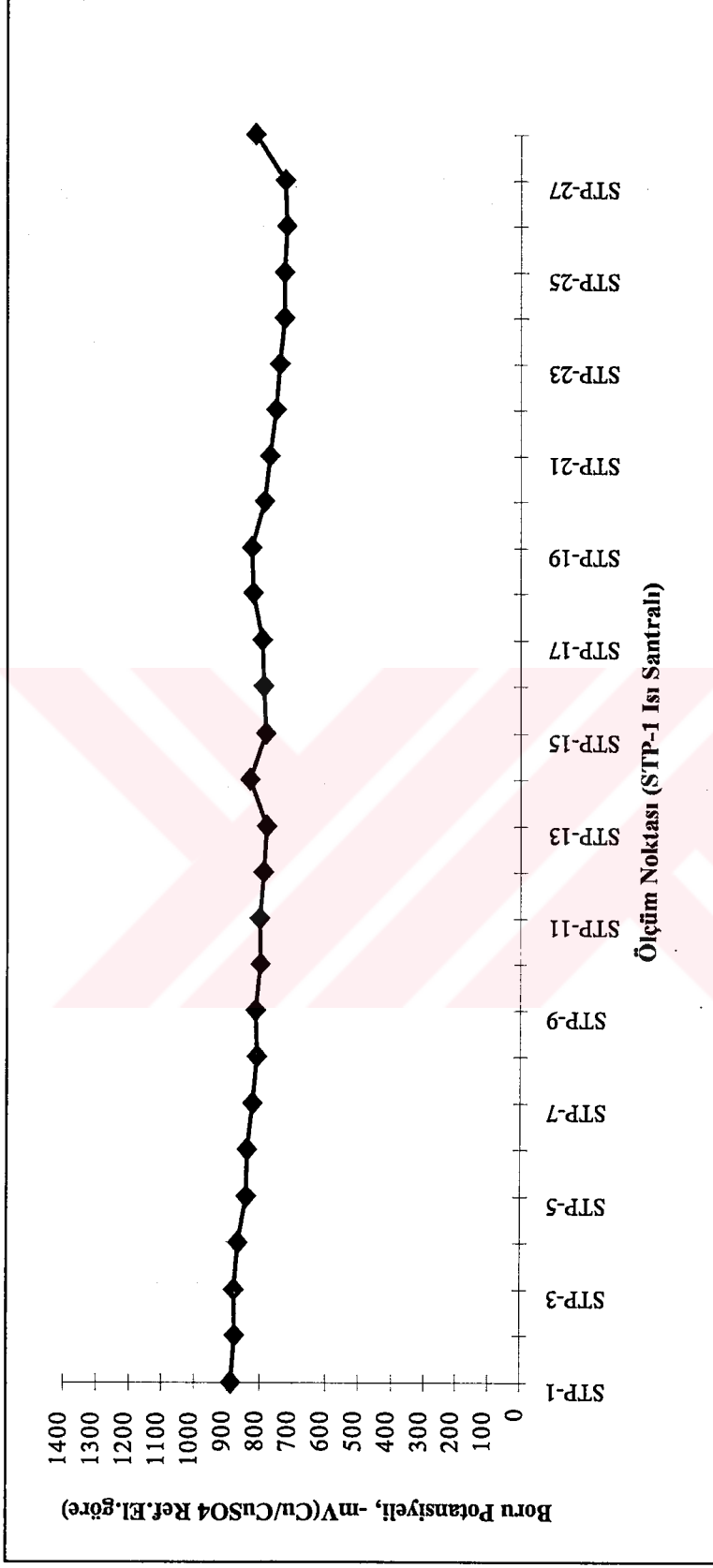




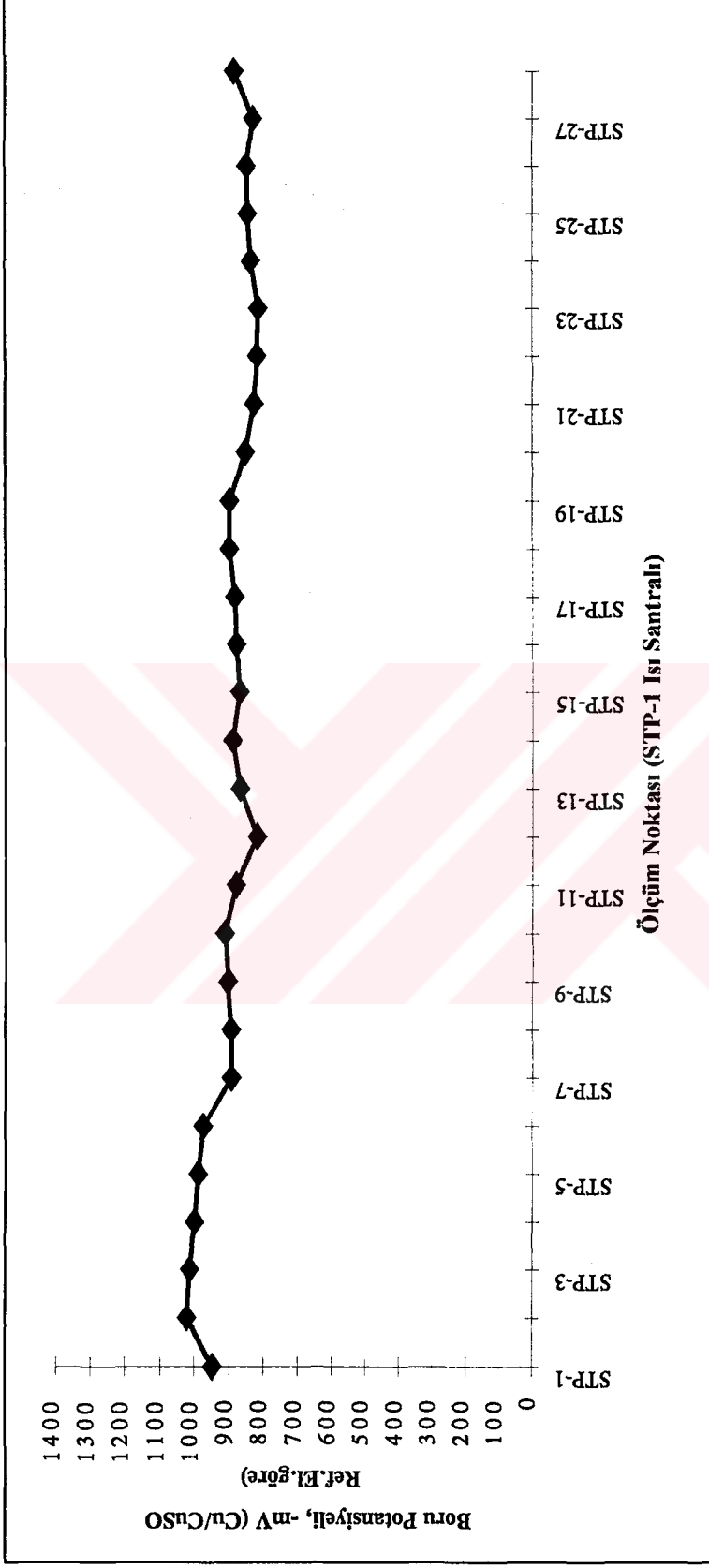
Şekil 18. 1.Ayda katodik koruma sistemi devrede değilken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



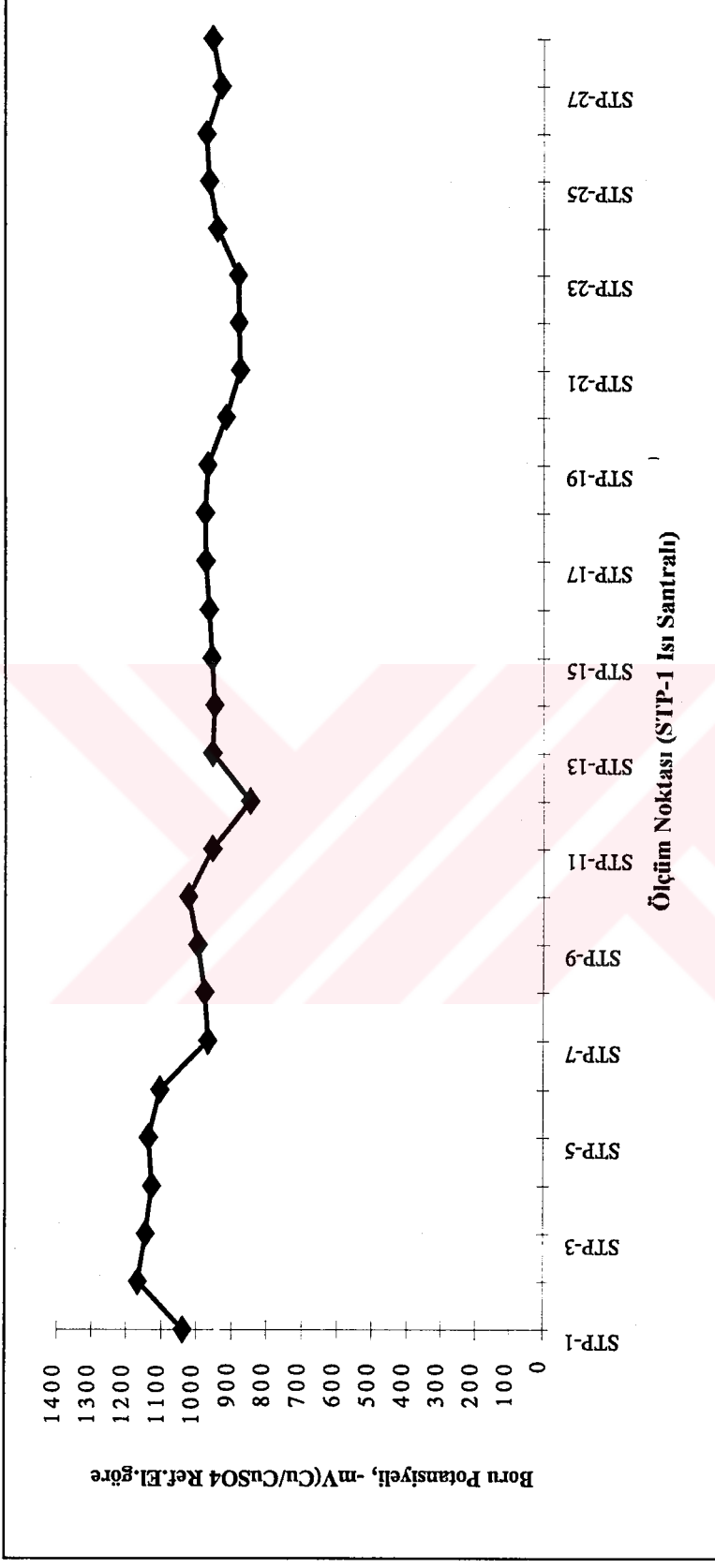
Şekil 19. 2.Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



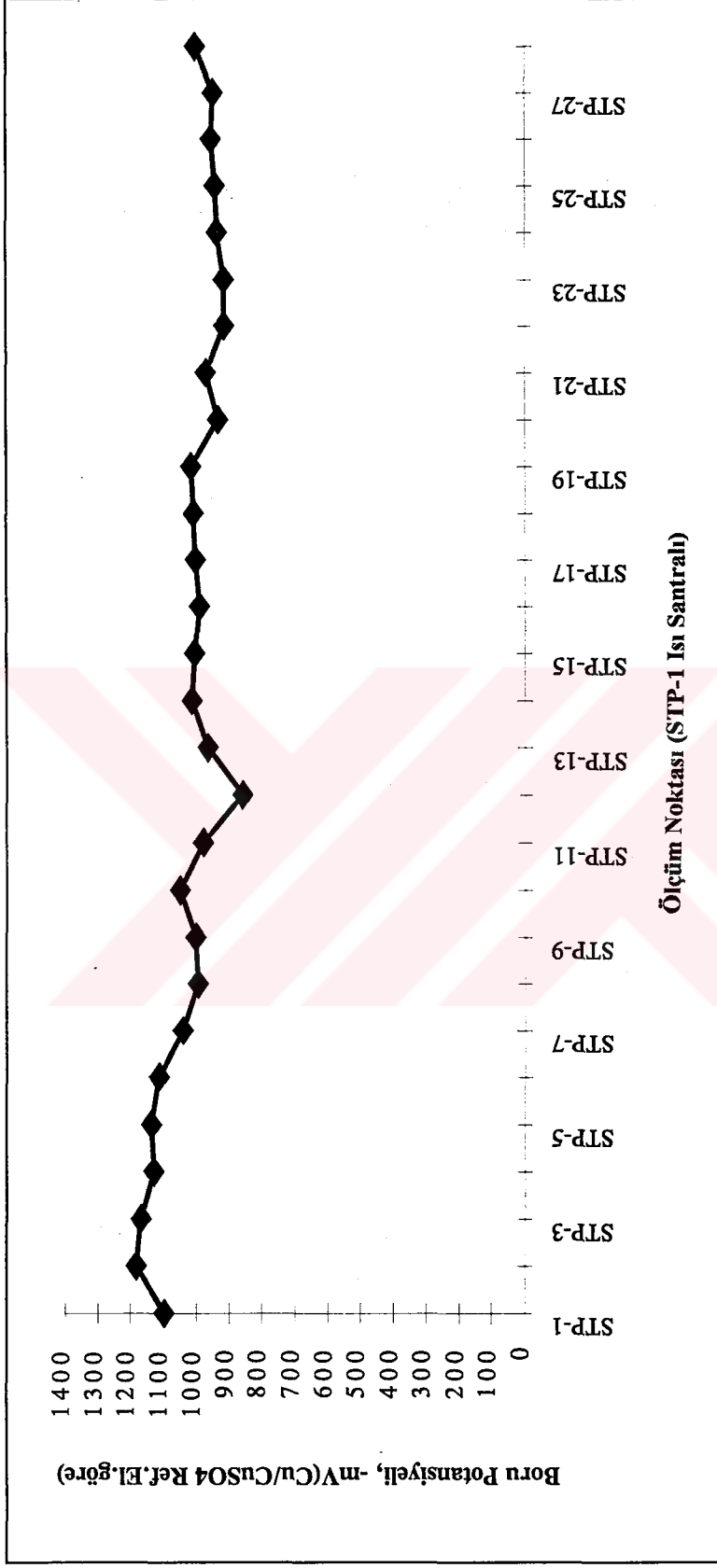
Şekil 20. 3.Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



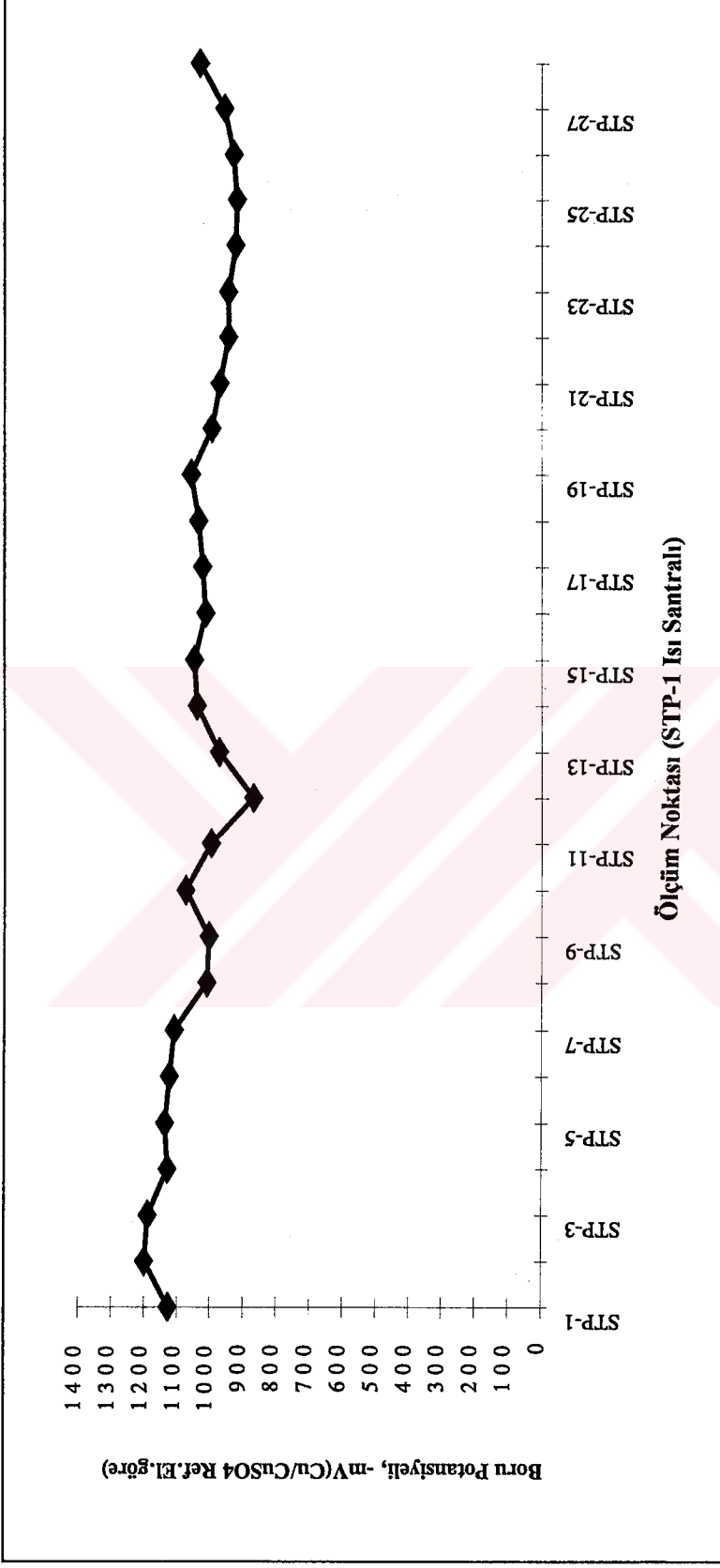
Şekil 21. 4. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



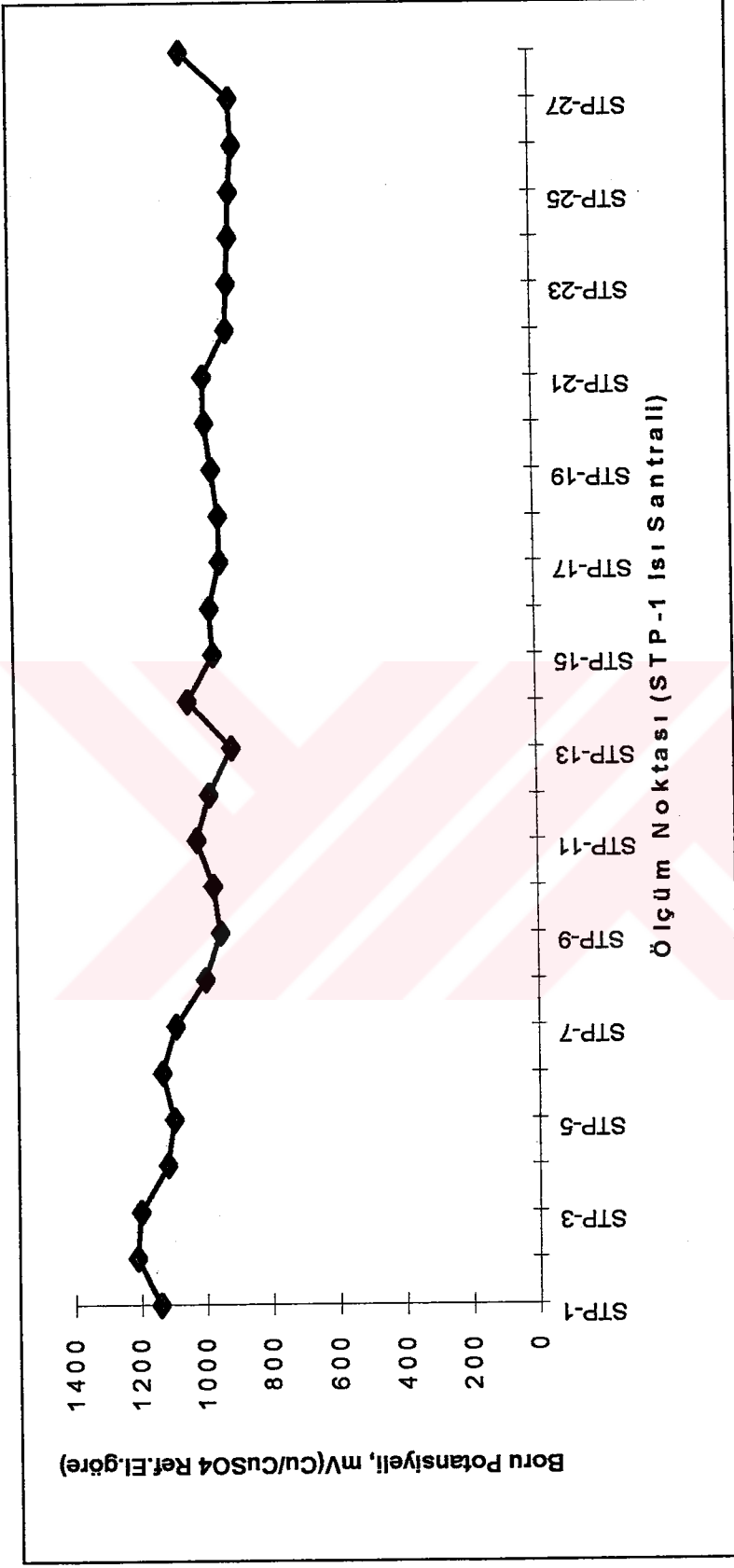
Şekil 22. 5.Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



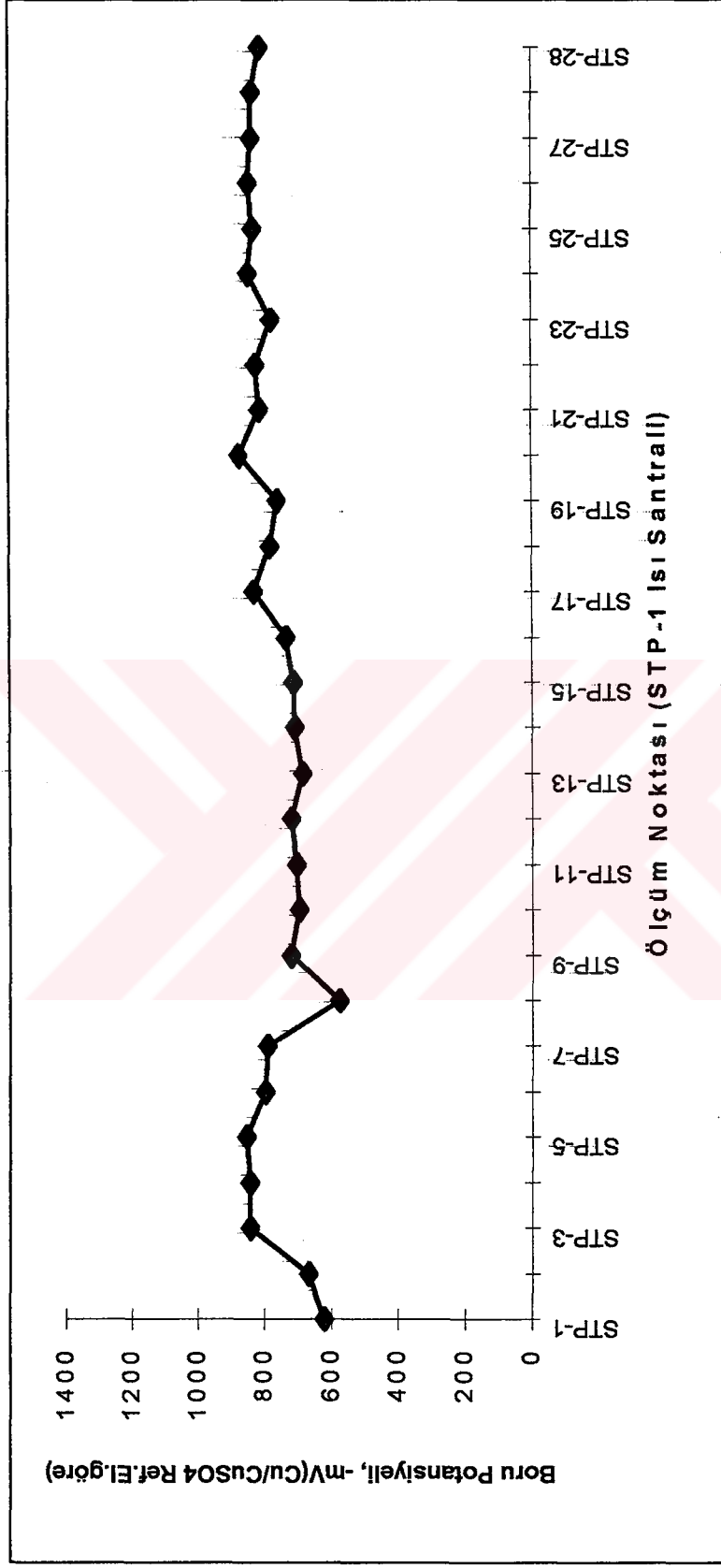
Şekil 23. 6.Ayda katodik koruma sistemi iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



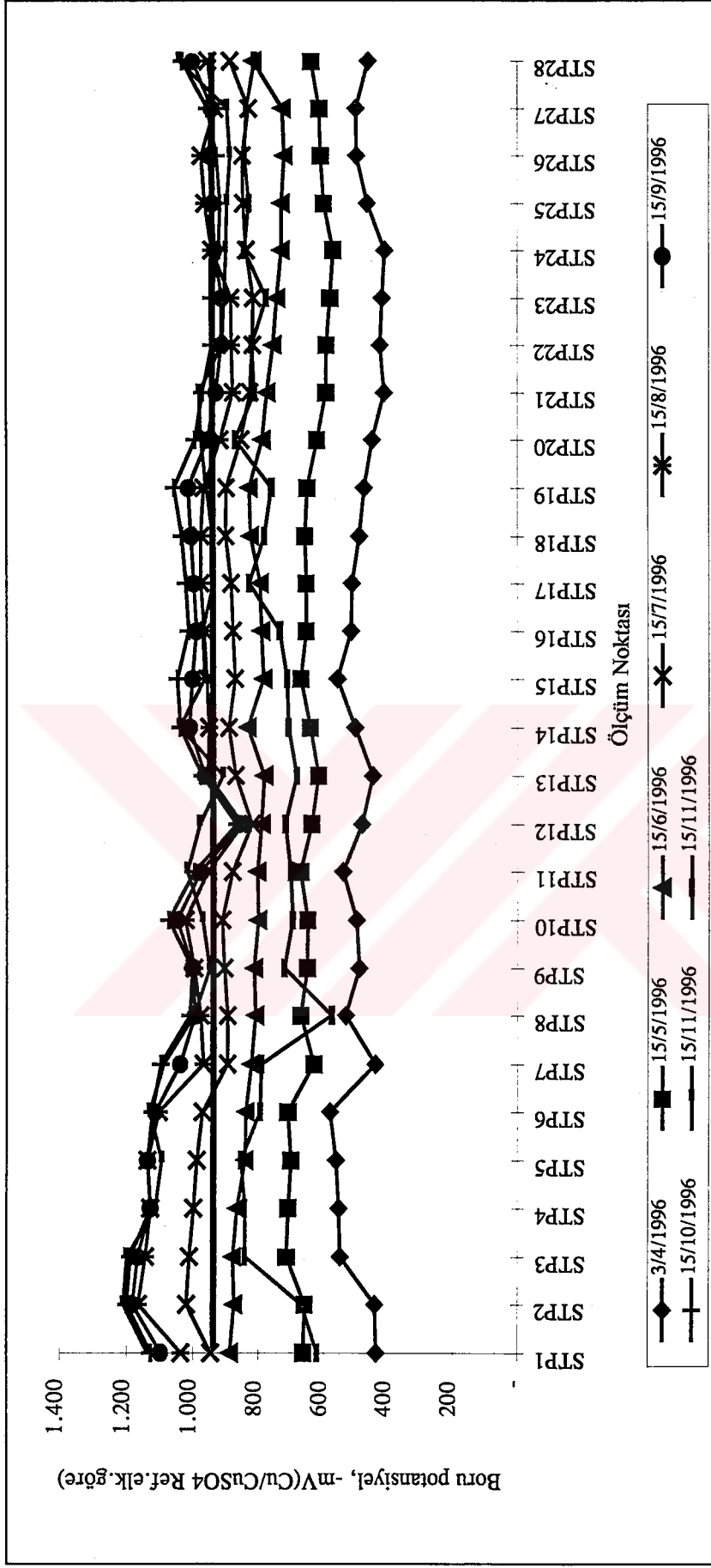
Şekil 24. 7. Ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği



Şekil 25. 8. ayda katodik koruma sistemi devrede iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.



Şekil 26. 8. ayda katodik koruma sistemi devre dışı iken alınmış olan boru potansiyel ölçümlerinin grafiği.



Şekil 27. Bütün ölçümlerin grafiği.

Uygulama deneylerinde ölçüm noktalarından 5 tanesi (Her 7 noktadan biri alınarak boru hattının zamana göre polarizasyon durumu incelenmiştir. Tablo-21 ve Tablo-22 de boru /zemin potansiyeli ve polarizasyon potansiyelleri değerleri verilmiştir. Bu değerlerin zamanla değişimi de Şekil-27 de verilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde görülmektedir ki 1.Ayda 1.Ayda boru hattına katodik koruma uygulanmış ve boru hattı 8.Ayda tam olarak polarize olmuştur. 2 ay daha beklendikten sonra boru hattının tam polarizasyonunu koruduğu görülmüştür. Bu tarihte borunun polarize haldeki katodik koruma akım ihtiyacı deneyi yapılmıştır. Polarizasyon kayması yönüyle uygulanarak elde edilen veriler Tablo-24 te verilmiştir. Bu değerlerde katodik koruma akım ihtiyacı $I = 0.36 \text{ mA/m}^2$ bulunmuştur. Bu değere ait hesaplamalar Ek-4 te verilmektedir.



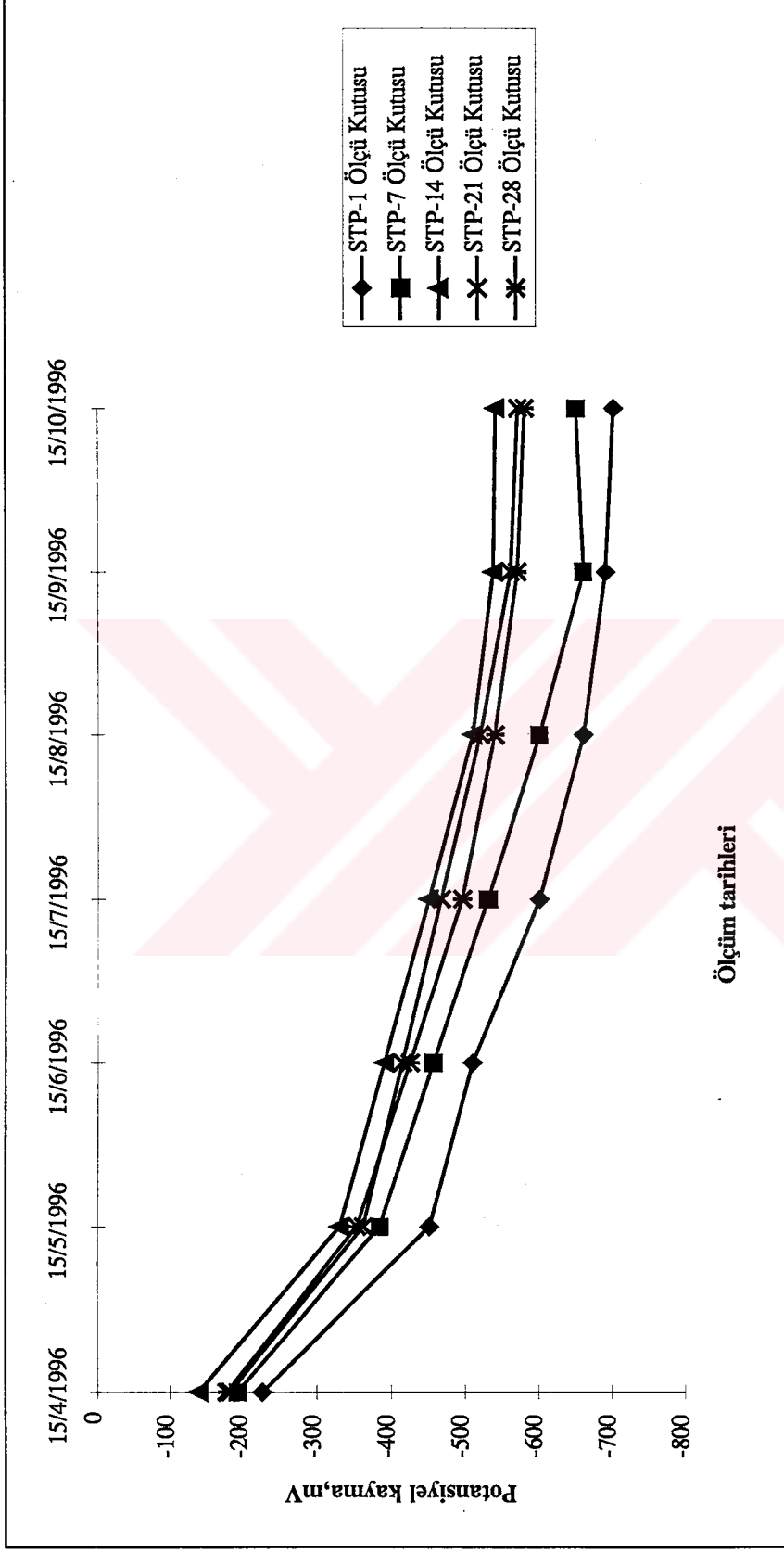
Tablo 21: Boru boyunca polarizasyon kayması için değerlendirilen ölçümler
(Her 7 ölçümden biri alınmıştır.)

	Doğal Potansiyel mV, DE_0	P/S ,mV DE_{on}	P/S ,mV DE_{on}	P/S ,mV DE_{on}	P/S ,mV DE_{on}	P/S ,mV DE_{on}	P/S ,mV DE_{on}
Tarih	03-04-96	15-05-96	15-06-96	15-07-96	15-08-96	15-09-96	15-10-96
Ö.K.No							
STP-1	-438	- 664	-889	-948	-1038	-1098	-1128
STP-7	-440	-632	-824	-897	-970	-1040	-1100
STP-14	-503	-642	-833	-893	-953	-1013	-1040
STP-21	-413	-594	-775	-828	-880	-933	-973
STP-28	-463	-640	-817	-888	-958	-1003	-1033

Tablo 22: Boru boyunca polarizasyon kayması için değerlendirilen ölçümler
ve polarizasyon kayma değerleri

	E,mV	E,mV	E,mV	E,mV	E,mV	E,mV
Tarih	15-05-96	15-06-96	15-07-96	15-08-96	15-09-96	15-10-96
Ö.K.No						
STP-1	-226	-451	-510	-600	-660	-690
STP-7	-192	-384	-457	-530	-600	-660
STP-14	-139	-330	-390	-450	-510	-537
STP-21	-181	-362	-415	-467	-520	-560
STP-28	-177	-354	-425	-495	-540	-570

$$DE = DE_{on} - DE_0$$



Şekil 28. Boru hattında zamanla oluşan polarizasyon kayma potansiyelleri değişimi.

Tablo 23: Boru boyunca polarizasyon kayması değerleri

	DE _{on} P/S,mV	DE _{off} P/S,mV	DE = DE _{on} - DE _{off}
Tarih	8.Ay	8.Ay	
Ö.K.No			
STP-1	-1139	-682	-457
STP-2	-1210	-670	-540
STP-3	-1200	-843	-357
STP-4	-1115	-842	-273
STP-5	-1096	-854	-242
ETP-6	-1132	-796	-336
STP-7	-1090	-792	-298
STP-8	-998	-576	-422
STP-9	-952	-723	-229
ETP-10	-972	-696	-276
STP-11	-1020	-704	-316
STP-12	-982	-719	-263
STP-13	-912	-685	-227
STP-14	-1043	-709	-334
STP-15	-966	-713	-253
STP-16	-972	-736	-236
STP-17	-942	-829	-113
STP-18	-944	-784	-160
STP-19	-962	-762	-200
STP-20	-980	-874	-106
STP-21	-984	-812	-172
STP-22	-913	-822	-91
STP-23	-908	-776	-132
STP-24	-901	-844	-57
STP-25	-900	-830	-70
STP-26	-888	-845	-43
STP-27	-898	-837	-61
STP-28	-1043	-812	-231

Her ölçü kutusu arası yaklaşık 550 metredir. Ve STP-1 Hattın ilk noktası olan ısı merkesi noktasındadır

5.1.4 Akım ihtiyacı değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan üç grup deney verilerinden hesaplanan akım ihtiyaç değerleri ile 14.4 km boruya uygulanan gerçek katodik koruma değerleri Tablo-25 te verilmektedir.

Tablo 24. Akım ihtiyacı değerleri

Laboratuvar deneyleri		Prototip model deneyleri	Arazi uygulama deneyleri	Katodik koruma gerçek uygulama akımı (mA/m ²)
Polarizasyon kırılma yöntemi(mA/m ²)	Polarizasyon kayması yöntemi (mA/m ²)	Polarizasyon kırılma yöntemi(mA/m ²)	Polarizasyon kayması yöntemi (mA/m ²)	
0,31	0,38	0,27	0,36	0,44

Bu tablodaki değerleri incelendiğinden tüm deneysel akım ihtiyacı değerlerinin gerçek katodik koruma uygulama değerinden küçük olduğu görülmektedir. 50 m lik borunun kullanıldığı prototip deneylerden elde edilen akım ihtiyacının en küçük olduğu ve laboratuvar deneylerinde polarizasyon kırılması yöntemi ile elde edilen akım ihtiyacının polarizasyon kayması ile elde edilen akım ihtiyacına çok yakın olduğu görülmektedir.

6. SONUÇ

Poliüretan kaplamalar ısı yalıtımı amacıyla kullanılmaktadır. Son yıllarda jeotermal enerjinin yaygın olarak kullanılmaya başlanması nedeniyle bu tür kaplamalı borular jeotermal akışkanı taşımak için de kullanılmaya başlanmıştır. Zemin içinde kullanılan her tür boru gibi poliüretan kaplamalı çelik boruların da korozyona karşı katodik koruma ile korunması gerekmektedir. Ancak literatürde bu tür kaplamalı borular için akım ihtiyaç değerleri henüz verilmemiştir. Bu tür kaplamalı borular için literatür ve uygulayıcılara veri oluşturmak amacıyla katodik koruma akım ihtiyaç deneyleri çeşitli tip ve yöntemlerle yapılmıştır. Laboratuvar tipi prototip model ve gerçek uygulama ile akım ihtiyaç deneyleri ve yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Labortuvar deneylerinde 1 m uzunluğunda 450 mm çapında gerçek poliüretan kaplamalı boru kullanılmıştır. İki farklı yöntemle bu kaplamaların akım ihtiyaç deneyleri yapılmış ve elde edilen deney sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Böylece her iki yönteminde akım ihtiyaç tesbitinde uygun olduğu kanaatine varılmıştır.
2. Prototip modelde 50 m uzunluğunda yine 450 mm çapında gerçek poliüretan kaplamalı boru kullanılmış ve deneyler doğal zeminde yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarından katodik koruma akım ihtiyacının labortuvar çalışmalarında elde edilen değerlerden daha olduğu görülmüştür.

3. 14.4 km lik gerçek boru hattı polarizasyon deneylerine 8 ay devam edilmiştir. Elde edilen polarizasyon grafiklerinden borunun 4 ay sonra tam polarize olduğu tesbit edilmiştir. Bu süre diğer kaplamalı borulara göre daha uzun bulunmuştur. Bu durum kaplamanın koruma etkinliğinin az olduğu göstermektedir. Bu açıdan bir değerlendirme yapılırsa poliüretan kaplamanın diğer plastik kaplamalara göre koruma etkinliğinin daha az olduğu sonucu çıkarılabilir.
4. Gerçek boru hattına uygulanmış katodik koruma sisteminde borunun tam polarize olmasından sonra 0,44 mA/m² akım çekildiği tesbit edilmiştir. Bu değer laboratuvar ve prototip çalışmalardan elde edilen değerle karşılaştırıldığında daha büyük olduğu grlmektedir. Bu durum, anot yatağından çıkan akımın bir kısmının evre metalik yapılara geçtiği sonucun doğurmaktadır. Bir katodik koruma sisteminden yabancı yapıya geçen akım kaçak akımdır. Böylece katodik koruma yapılan sistemlerin yakınında bulunan ve interferans etki alanına giren diğer metalik yapılarında sistemden çekilen akım üzerinde etkili olduğu sonucuna varılabilir.
5. Boru hattının boru boyuna göre çizilmiş boru-zemin potansiyel değerleri incelendiğinde borunun katodik korumasız başka bir boru ile kesim noktalarında bir potansiyel düşüşü gösterdiği tesbit edilmiştir. İnterferans etkisi olarak açıklanabilen bu potansiyel düşüşünün borunun koruma kriterleri için etkin olabileceği ve sistemden çekilen akımında aynı ölçüde etkileyebileceği sonucuna varılmıştır.

6. Borunun akım ihtiyacı ve kaplama direnci literatürde belirli kaplamalar mukayese edildiğinde poliüretan kaplamaların polietilen kaplamalara göre çok az koruma etkinliği gösterebileceği ve yaklaşık tek kat sargılı bitüm kaplama direnci ve akım ihtiyacına eşdeğer olduğu görülmüştür.



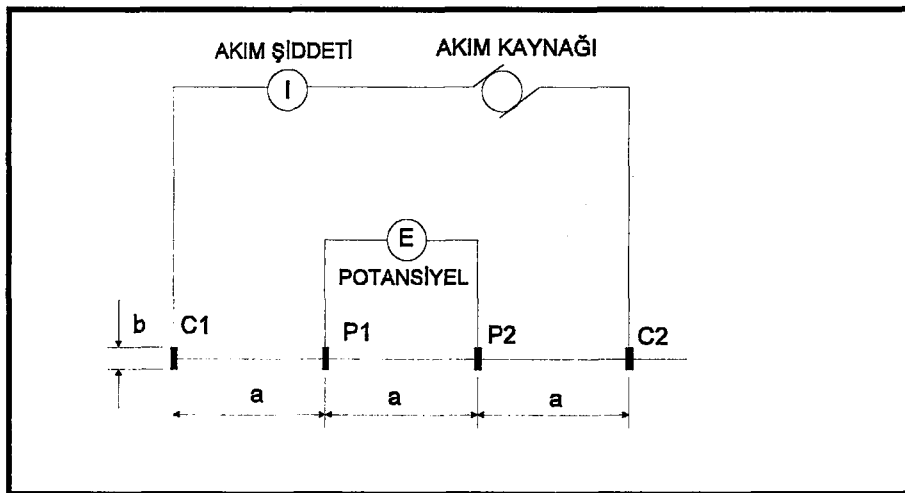
EKLER

EK.1

WENNER DÖRT NOKTA YÖNTEMİ İLE ZEMİN ÖZDİRENÇ ÖLÇÜMLERİ

Zeminlerin elektrik özgül direnci TS-4363' uygun olarak boru hattı boyunca en az 100 metre en çok 200 metre aralıklarla ölçülür. Zemin cinsi ve yapısının tekdüze olduğu bölgelerde ise , 500 metre -1000 metre aralıklarla yapılması yeterlidir.

Zemin rezistivitesi çeşitli metodlarla ölçülmektedir. En çok kullanılan metot WENNER dört elektrot metodudur. Bu metotla öz direnç ölçümü Şekil.36 de görülmektedir.



Şekil 29. Wenner 4 nokta ölçüm detayı.

Aletten okunan R direnci aşağıdaki formülde yerine konularak zemin rezistivitesi r bulunur.

$$r=2.p.a.R$$

Burada,

- r = Zemin rezistivitesi, Ohm.cm
- a = Elektrot açıklığı ,cm
- R = Aletten okunan direnç, Ohm' dur.



EK.2

BORU AKIM İHTİYACININ KAPLAMA DİRENCİ YOLU İLE HESAPLANMASI

Laboratuvar deneyleri için;

Boru boyu	=	1 metre
Boru çapı	=	450 mm
Boru alanı,	=	1.413 m ²
Boru et kalınlığı	=	6,3 mm
Em	=	-30 mV
Akım	=	0,65 mA
x	=	1 metre
r	=	0,17x10 ⁻⁶ Ohm.m
DV	=	1000 mV

Birim uzunluktaki borunun kaplama direnci

$$\begin{aligned}
 R &= DV/I \\
 R &= 1000 \text{ mV} / 0,65 \text{ mA} \\
 R &= 1538.46 \text{ Ohm.x.1 metre boru} \\
 R &= 1538.46 \text{ Ohm.m} \\
 R &= 1538.46 \text{ Ohm.m x}(3,14 \times 0,45 \text{ m}) \\
 R &= 2173,84 \text{ Ohm.m}^2
 \end{aligned}$$

bulunur.

a (attenation sabiti)

$$a = \sqrt{\frac{r(\text{Ohm})}{R(\text{Ohm.m})}} = \text{m}^{-2}$$

$$S = \frac{p}{4} (D^2 - (D - X_w)^2)$$

$$S = \frac{P}{4} (0.45^2 - (0.45 - 12.6/1000)^2)$$

$$S = 0,008777 \text{ m}^2$$

$$r = \rho \frac{L}{S}$$

$$r = 0,17 \times 10^{-6} (\text{Ohm.m}) \times \frac{1(\text{m})}{0,008777 \text{ m}^2}$$

$$r = 1,936 \times 10^{-5} \text{ Ohm}$$

$$R = 1534 \text{ Ohm.m}$$

$$a = \sqrt{\frac{1,936 \times 10^{-5} (\text{Ohm})}{1534 (\text{Ohm.m})}}$$

$$a = 0,000112 \text{ m}^{-1}$$

$$I_o = \frac{a}{r} E_m \sinh aL$$

$$I_o = \frac{0,000112}{1,936 \times 10^{-5}} (30/1000) \times \sinh(0,000112 \times 1) / 1.413$$

$$I_o = 0,3818 \text{ mA/m}^2$$

Uygulama deneyleri

Boru boyu	=	14400 metre
Boru çapı	=	450 mm
Boru alanı,	=	20347 m ²
Boru et kalınlığı	=	6,3 mm
Em	=	-231 mV
Akım	=	9000 mA
x	=	1 metre
r	=	0,17x10 ⁻⁶ Ohm.m
DV	=	962 mV

Birim uzunluktaki borunun kaplama direnci

$$R = DV/I$$

$$R = 962 \text{ mV} / 9000 \text{ mA}$$

$$R = 0,1068 \text{ Ohm.x.14400 metre boru}$$

$$R = 1539.2 \text{ Ohm.m}$$

$$R = 1539.2 \text{ Ohm.m x}(3,14 \times 0,45 \text{ m})$$

$$R = 2173,84 \text{ Ohm.m}^2$$

bulunur.

a (attenation sabiti)

$$a = \sqrt{\frac{r(\text{Ohm})}{R(\text{Ohm.m})}} = \text{m}^{-2}$$

$$S = \frac{P}{4} (D^2 - (D - X_w)^2)$$

$$S = \frac{P}{4} (0,45^2 - (0,45 - 12,6/1000)^2)$$

$$S = 0,008777 \text{ m}^2$$

$$r = \rho \frac{L}{S}$$

$$r = 0,17 \times 10^{-6} (\text{Ohm.m}) \times \frac{1(\text{m})}{0,008777 \text{m}^2}$$

$$r = 1,936 \times 10^{-5} \text{ Ohm}$$

$$R = 1534 \text{ Ohm.m}$$

$$a = \sqrt{\frac{1,936 \times 10^{-5} (\text{Ohm})}{1534 (\text{Ohm.m})}}$$

$$a = 0,000112 \text{ m}^{-1}$$

$$I_o = \frac{a}{r} E_m \text{Sinha} L$$

$$I_o = \frac{0,000112}{1,936 \times 10^{-5}} (231/1000) \times \text{Sinh}(0,000112 \times 14400) / 20347$$

$$I_o = 0,355 \text{ mA/m}^2$$

$$\text{T/R ünitesi çalışma değeri} = 9000 \text{ mA}$$

$$\text{Boru yüzey alanı} = 20347 \text{ m}^2$$

$$\text{Katodik Koruma gerçek uygulama değeri} = 9000/20347 = 0.44 \text{ mA/m}^2:$$

KAYNAKLAR

Beackmann,W.G.,”Cathodic Protection of Underground Pipelines,Europe and Oil ,”Ağustos,1973

Balbaşı,M.,”Katodik Koruma Sistemlerinde Kullanılan Çinko Anotların Akım Kapasitelerinin İncelenmesi”, Y.Lisans Tezi,G.Ü.F.B.Enst., Mayıs 1988

Banach,J,L., “Evaluating design and cost of pipe line coatings “,Pipe Line Industry, 3,62,(1988)

Bazoni,B., Lazzari İ,L., “A new Approach for Automatic Control and Monitoring of Cathodically Protected Reinforced Concrete Structures “, Materials Performance, 12,13,(1992)

Çakır,A,F.,Akgün,V.,Ürgen,M.,”Korozyonun Türk Ekonomisine Maliyeti “, İTÜ, 1990

Çakır,A.,”Metalik Korozyon İlkeleri ve Kontrolü”, TMMOB,Mak.Müh.Odası., Ankara,Ocak 1990

Decarlo E,A., Wagner,J. “Various Applications of the Personel Computer in Corrosion Engineering ” ,Materials Performance, 6,21,(1988)

Degerstedt,M,R., Kennelley,K,J “Computer Modelling Aids Traditional Cathodic Protection Design Methods for Coated Pipelines ”,Materials Performance, 6,16,(1996)

Deskins,R,L., “Cathodic Protection Of A Mortar Coated Steel Water Distribution System“,Materials Protection, 9,35,(1966)

Doruk,M.,” Korozyon Ve Önlenmesi”, Ödtü Mühendislik Fakültesi Yayınları,No:70,Ankara,1982

Gervais,M., “Eigth Years Experience With Rectifier Remote Monitoring “ ,Materials Performance, 2,42,(1996)

Gummow,R,A., “Cathodic Protection Criteria-A Crtitcal Rewiew Of Nace Standart Rp-01-69 “ , Materials Performance, 9,9,(1986)

Hussock,R.,Wilson,R., “Potantials And Hydrogen Evolution On Coated Pipe”, Materials Performance, 9,26,(1984)

Karlsson,T.,”Geothermal District Heating “ , (1986)

Kellner,J,D., “Laboratory Evaluation Of In-Ground Cathodic Disbondment Of Pipeline Coatings" ,Materials Performance, 9,20,(1986)

Mills,G., “The Pipe Coating As An Engineered Part Of The Cathodic Protection System, Materials Performance, 9,13,(1988)

Nicholas ,K,W., "Designing Cathodic Protection System Using Electronic Spreadsheets'',Materials Performance, 9,25,(1986)

Nicholas,K,W., "Using An Expert System For Cathodic Protection '' ,Materials Performance, 9,17,(1988)

Orton, M.D., "The Effectiveness Of Cathodic Protection Under Unbonded Coating On Pipelines", Materials Performance, 6,17,(1985)

Schweitzer,P,A., "Corrosion Ve Corrosion Protection Handbook",Marcel Dekker Inc,New York,1983

Toncre,A,C., "On Achieving Polarization Beneath Unbonded Pipe Coatings'' ,Materials Performance, 8,22,(1984)

Yalçın,H.,Koç,T., "Derinkuyu Anot Yatakları", Korozyon Dergisi, 12,12,(1994)

Yalçın,H.,Koç,T., "Korozyon Ve Katodik Koruma",Ankara,1995

Yalçın,H.,Koç,T., "Dış Akım Kaynağı Ile Katodik Olarak Korunmuş Boru Hatlarında Akım Ve Potansiyelin Kaplama Direncine Göre Değişimi", İller Bankası Dergisi, 12,12,(1988)

Yalçın,H.,Koç,T., "Yeraltı Çelik Boru Hatlarının Katodik Koruma Sistemlerinde Akım İhtiyacının Belirlenmesi", Tübitak Doğa Dergisi, 12,12,(1992)

Yalçın,H.,Koç,T.,Akat,O.,Kendı,E,R.,”Katodik Koruma Sistemlerinin
İşletilmesi Bakım Ve Onarım Ders Notları”,Poaş
Genel Md.Lüğü,Ankara,1990



ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında Erzincan'da doğdum. İlk ,Orta ve Lise öğrenimimi Erzincan'da tamamladıktan sonra , 1986 yılında Ankara Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümüne girdim.1990 yılında lisans öğrenimimi tamamlayıp bir yıl sonra aynı bölümde yüksek lisans programına başladım. Halen özel bir mühendislik şirketinde korozyon ile ilgili çalışmalarına devam etmekteyim

