

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ « FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLİS DUMANI KATKILI BETONDA KLORÜR ETKİSİNDE KOROZYON
OLUŞUMU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Suzan YAMAÇ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ « FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİLİS DUMANI KATKILI BETONDA KLORÜR ETKİSİNDE KOROZYON
OLUŞUMU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Suzan YAMAÇ
(501061119)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL (İTÜ))
Diğer Jüri Üyeleri : Y. Doç. Dr. Hakan N. Atahan (İTÜ)
Prof. Dr. Turan Özturan (BÜ)**

HAZİRAN 2010

Benden sevgilerini hiç bir zaman esirgemeyen, her zaman ve her yerde yanımda olduklarını hissettiren aileme, canım anneme ve canım babama,

ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince bilgisi ile beni yönlendiren, her zaman destek veren çok değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. M. Hulusi ÖZKUL'a, deneysel ve literatür çalışmalarında daima destek veren Sayın Y. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN'a, toz çıkarma aletini kullanmama izin veren Sayın Özkan Şengül'e, 3 yıl süresince laboratuarda yaptığım deneylerde bana destek olan en başta babam Sefer YAMAÇ ve annem Şefiye YAMAÇ, kardeşim Erkan YAMAÇ, çok sevgili dayım Metin ÇALIŞKAN ve burada isimlerini veremediğim, bilime destek olan tüm aydın dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2010

Suzan Yamaç
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Beton Bileşenleri	2
1.1.1 Agregalar	2
1.1.2 Çimento	2
1.1.3 Su.....	2
1.2 Betonun Durabilitesi	2
1.3 Puzolanlar	3
1.3.1 Uçucu kül.....	3
1.3.2 Yüksek fırın cürufu	4
1.3.3 Silis dumanı	4
1.3.3.1 Silis dumanı kullanımının beton üzerindeki etkileri	5
2. BETONA GÖMÜLÜ ÇELİK DONATININ KOROZYONU	7
2.1 Beton İçerisinde Korozyon Gelişimi.....	8
2.1.1 Elektrolit olarak beton	9
2.1.2 Betonun korozyon aktivitesi	10
2.2 Elektrokimyasal Korozyonun Mekanizması.....	11
2.3 Beton İçindeki Çelik Korozyonunun Prensipleri	11
2.3.1 Birincil elektrokimyasal süreç	12
2.3.2 İkincil elektrokimyasal süreç	13
2.4 Beton İçindeki Çeliğin Korozyon Başlangıcı	13
2.4.1 Karbonatlaşma nedeni ile oluşan korozyon.....	14
2.4.2 Klorür etkisinde oluşan korozyon	15
2.4.2.1 Klorür etki mekanizması	15
2.4.2.2 Eşik klorür konsantrasyonu	15
2.5 Korozyon Ölçüm Yöntemleri	16
2.5.1 Elektrokimyasal yöntemler	16
2.5.1.1 Yarı hücre potansiyeli	16
2.5.1.2 AC empedans yöntemi	18
2.5.1.3 Lineer polarizasyon yöntemi	18
2.5.1.4 İletkenlik ölçümü (öz direnç ölçümü)	21
2.5.2 Ağırlık kaybı yöntemleri (gravimetrik yöntemler)	21
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	23
3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler.....	23

3.1.1 Agregalar ve bağlayıcılar	23
3.1.2 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı	24
3.1.3 Beton içerisinde gömülü çelik donatı	24
3.2 Merkezi Karma Tasarım Yöntemi	24
3.3 Beton Karışımları.....	25
3.4 Korozyon Deneyleri.....	26
3.4.1 Lineer polarizasyon, yarı hücre ve öz direnç ölçümü.....	26
3.4.2 Klorür içeriği analizi	27
3.4.2.1 Titrimetrik analiz (potansiyometrik titrasyon)	30
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	33
4.1 Durabilite Deneyleri.....	33
4.1.1 Korozyon hızı ölçümlerinin değerlendirilmesi.....	34
4.1.2 Korozyon potansiyeli ölçümlerinin değerlendirilmesi.....	35
4.1.3 Öz direnç ölçümlerinin değerlendirilmesi.....	37
4.2 Klorür Konsantrasyonları Analiz Sonuçları.....	38
4.3 İstatistiksel Değerlendirmeler.....	43
4.3.1 Korozyon hızı	44
4.3.2 Korozyon potansiyeli	50
4.3.3 Öz direnç	56
4.3.4 Korozyon başlangıç süreleri	62
5. GENEL SONUÇLAR.....	65
KAYNAKLAR	67
EKLER	71

KISALTMALAR

A_k	: Donatının aktif olarak korozyona uğradığı alan
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
B	: Stern-Geary sabiti
β_a	: Anodik Tafel sabiti
β_c	: Katodik Tafel sabiti
ΔE	: Polarizasyon değişimi
ΔI	: Akım değişimi
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli
I_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
MKT	: Merkezi Karma Tasarım
R_p	: Polarizasyon direnci

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Betonların klorür geçirgenliğine silis dumanının etkisi.....	6
Çizelge 2.1 : Korozyon potansiyeli belirlenmesinde kullanılan referans elektrod değerleriyle korozyon riski arasındaki ilişki.	17
Çizelge 2.2 : Korozyon akım yoğunluğuna göre korozyon durumu.	20
Çizelge 2.3 : Betonun öz direnci ile korozyon riski arasındaki ilişki.	21
Çizelge 3.1 : Beton karışımında kullanılan agrega oranları	23
Çizelge 3.2 : Silis dumanının kimyasal özellikleri.	23
Çizelge 3.3 : Kullanılan süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri	24
Çizelge 3.4 : Betonlar için belirlenen değişkenler ve değişim aralıkları.....	25
Çizelge 3.5 : Beton karışım oranları.....	26
Çizelge 3.6 : Klorür analizi yapılan katman derinlikleri	29
Çizelge 4.1 : Hava ve su kürü uygulanmış numunelerin korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve öz direnç değerlerinin ortalamaları	33
Çizelge 4.2 : Geçen akım (coulomb)-klorür geçirimsizliği değerleri	42
Çizelge 4.3 : Klorür konsantrasyonu-derinlik değerleri.....	43
Çizelge 4.4 : Korozyon hızları için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri	45
Çizelge 4.5 : Korozyon potansiyelleri için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri	51
Çizelge 4.6 : Öz direnç değerleri için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri	57
Çizelge 4.7 : Havada tutulan numunelerde korozyon başlangıç süreleri için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri	62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 :	Aynı derecede büyütülmüş Portland çimentosu (solda) ve silis dumanının(sağda) görüntüsü.....	5
Şekil 2.1 :	Hidrate çimento pastası içindeki unsurlar ve boyutları	9
Şekil 2.2 :	Donatının anot kısmındaki demirin çözünüp katotta pas oluşturması....	12
Şekil 2.3 :	Donatı hacmi ve korozyon reaksiyonu ürünü arasındaki ilişki	13
Şekil 2.4 :	Bakır-bakır sülfat yarı hücre devresi.	17
Şekil 2.5 :	Dış akıma karşı polarizasyon aşırı gerilimi.....	19
Şekil 2.6 :	Lineer polarizasyon ölçümünde kullanılan deney düzeneği.	20
Şekil 3.1 :	Donatının epoksi ile kaplanması	24
Şekil 3.2 :	Korozyon ölçümlerinde kullanılan GECOR 8 Cihazı	27
Şekil 3.3 :	Toz çıkartma işlemi için kullanılan torna cihazı	28
Şekil 3.4 :	Toz çıkartma işlemine tabi tutulan numune örneği	29
Şekil 3.5 :	Eşik klorür konsantrasyonu tayininde kullanılan Titralab 840 cihazı	30
Şekil 3.6 :	Titrasyon eğrisi.....	31
Şekil 4.1 :	Havada tutulan S15 numunelerinin korozyon hızının zamanla değişimi.....	34
Şekil 4.2 :	Suda tutulan S15 numunelerinin korozyon hızının zamanla değişimi.....	35
Şekil 4.3 :	Havada tutulan S15 numunelerinin korozyon potansiyelinin zamanla değişimi.....	36
Şekil 4.4 :	Suda tutulan S15 numunelerinin korozyon potansiyelinin zamanla değişimi.....	36
Şekil 4.5 :	Havada tutulan S15 numunelerinin öz direnç değerlerinin zamanla değişimi.....	37
Şekil 4.6 :	Suda tutulan S15 numunelerinin öz direnç değerlerinin zamanla değişimi.....	37
Şekil 4.7 :	Havada tutulan S4 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	39
Şekil 4.8 :	Havada tutulan S7 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	39
Şekil 4.9 :	Havada tutulan S8 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	39
Şekil 4.10 :	Havada tutulan S11 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	40
Şekil 4.11 :	Havada tutulan S12 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	40
Şekil 4.12 :	Havada tutulan S15 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	40
Şekil 4.13 :	Havada tutulan S16 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	41
Şekil 4.14 :	Havada tutulan S17 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	41

Şekil 4.15 : Havada tutulan S18 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi.....	42
Şekil 4.16 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 300 dozlu numunelerin korozyon hızı analizi.....	45
Şekil 4.17 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 350 dozlu numunelerin korozyon hızı analizi.....	46
Şekil 4.18 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 400 dozlu numunelerin korozyon hızı analizi.....	46
Şekil 4.19 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,03 olan numunelerin korozyon hızı analizi.....	47
Şekil 4.20 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,07 olan numunelerin korozyon hızı analizi.....	47
Şekil 4.21 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,12 olan numunelerin korozyon hızı analizi.....	48
Şekil 4.22 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin korozyon hızı analizi.....	48
Şekil 4.23 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin korozyon hızı analizi.....	49
Şekil 4.24 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin korozyon hızı analizi.....	49
Şekil 4.25: Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 300 dozlu numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	51
Şekil 4.26 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 350 dozlu numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	52
Şekil 4.27 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 400 dozlu numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	52
Şekil 4.28 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,03 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	53
Şekil 4.29 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,07 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	54
Şekil 4.30 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,12 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	54
Şekil 4.31 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	55
Şekil 4.32: Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	55
Şekil 4.33 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi.....	56
Şekil 4.34 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 300 dozlu numunelerin öz direnç analizi.....	57
Şekil 4.35 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 350 dozlu numunelerin öz direnç analizi.....	58
Şekil 4.36 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 400 dozlu numunelerin öz direnç analizi.....	58
Şekil 4.37 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,03 olan numunelerin öz direnç analizi.....	59
Şekil 4.38 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,07 olan numunelerin öz direnç analizi.....	59
Şekil 4.39 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,12 olan numunelerin öz direnç analizi.....	60

Şekil 4.40 :	Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin özdirenc analizi.....	60
Şekil 4.41 :	Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin özdirenc analizi.....	61
Şekil 4.42 :	Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin özdirenc analizi.....	61
Şekil 4.43 :	Havada tutulan su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin korozyon başlangıç süreleri analizi.....	63
Şekil 4.44 :	Havada tutulan su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin korozyon başlangıç süreleri analizi.....	64
Şekil 4.45 :	Havada tutulan su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin korozyon başlangıç süreleri analizi.....	64
Şekil A.1:	Havada tutulan S1 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	73
Şekil A.2:	Suda tutulan S1 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	74
Şekil A.3:	Havada tutulan S2 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	75
Şekil A.4:	Suda tutulan S2 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	76
Şekil A.5:	Havada tutulan S3 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	77
Şekil A.6:	Suda tutulan S3 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	78
Şekil A.7:	Havada tutulan S4 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	79
Şekil A.8:	Suda tutulan S4 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	80
Şekil A.9:	Havada tutulan S5 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	81
Şekil A.10:	Suda tutulan S5 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	82
Şekil A.11:	Havada tutulan S6 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	83
Şekil A.12:	Suda tutulan S6 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	84
Şekil A.13:	Havada tutulan S7 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	85
Şekil A.14:	Suda tutulan S7 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	86
Şekil A.15:	Havada tutulan S8 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	87
Şekil A.16:	Suda tutulan S8 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	88
Şekil A.17:	Havada tutulan S9 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	89
Şekil A.18:	Suda tutulan S9 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	90
Şekil A.19:	Havada tutulan S10 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenc.....	91

Şekil A.20: Suda tutulan S10 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	92
Şekil A.21: Havada tutulan S11 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	93
Şekil A.22: Suda tutulan S11 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	94
Şekil A.23: Havada tutulan S12 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	95
Şekil A.24: Suda tutulan S12 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	96
Şekil A.25: Havada tutulan S13 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	97
Şekil A.26: Suda tutulan S13 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	98
Şekil A.27: Havada tutulan S14 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	99
Şekil A.28: Suda tutulan S14 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	100
Şekil A.29: Havada tutulan S15 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	101
Şekil A.30: Suda tutulan S15 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	102
Şekil A.29: Havada tutulan S16 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	103
Şekil A.30: Suda tutulan S16 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	104
Şekil A.31: Havada tutulan S16 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	105
Şekil A.32: Suda tutulan S16 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	106
Şekil A.33: Havada tutulan S17 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	107
Şekil A.34: Suda tutulan S17 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	108
Şekil A.35: Havada tutulan S18 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	109
Şekil A.36: Suda tutulan S18 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	110
Şekil A.37: Havada tutulan S19 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	111
Şekil A.38: Suda tutulan S19 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	112
Şekil A.39: Havada tutulan S20 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	113
Şekil A.40: Suda tutulan S20 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.....	114

SİLİS DUMANI KATKILI BETONDA KLORÜR ETKİSİNDE KOROZYON OLUŞUMU

ÖZET

Sertleştikten sonra çevre koşullarına ve yangına karşı dayanıklı hale gelen beton, servis ömrü boyunca mekanik, fiziksel veya kimyasal yollarla hasara uğrayabilir. Donma-çözünme, değişen nem koşulları, aşındırıcı yükler, asit, sülfat, alkali agrega reaksiyonu, klorür veya karbonatlaşma etkisi betona zarar veren en önemli etkenlerdir. Bu dış etkiler altında betonun servis ömrü boyunca performansı olumsuz olarak etkilenir.

Klorür etkisindeki çelik korozyonu, betonarme yapılar için en yaygın hasarlardan birisidir. Yüksek alkaliniteye sahip iyi kaliteli beton, içinde gömülmüş olan çelik yüzeyinde pasif bir film tabakası oluşturarak korozyonun oluşmasını önler. Ancak klorür etkisinde, pasivasyon tabakası zarar görür ve çelik korozyona uğrar.

Bu tez çalışmasında klorür etkisindeki silis dumanı katkılı beton numunelerin içinde gömülü çelik donatının korozyonu araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı silis dumanı/toplam bağlayıcı, su/toplam bağlayıcı oranları ve toplam bağlayıcı miktarları kullanılarak üretilen ve içine donatı yerleştirilen silindir numuneler doksan günlükken sırası ile yedi gün bir molar NaCl çözeltisi içerisinde ve yedi gün havada olacak şekilde çevrimlere maruz bırakılmıştır. İki haftada bir olmak üzere özel geliştirilmiş GECOR 8 cihazı yardımı ile öz direnç, yarı hücre potansiyeli ve korozyon hızı ölçümleri yapılmıştır.

Ayrıca korozyon başlangıcına ulaştığı belirlenen numunelerin farklı katmanları toz haline getirilerek potansiyometrik titrasyon yöntemi ile klorür içerikleri ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonuçları, betona silis dumanı katılmasının betonun korozyon dayanıklılığını arttırdığını göstermiştir.

CHLORIDE INDUCED CORROSION WITHIN SILICA FUME ADDED CONCRETE

SUMMARY

Even though hardened concrete is resistant to ambient conditions and fire, mechanical, physical or chemical effects can damage the concrete during service life. Freeze-thaw, changing humidity conditions, abrasive loads, acid, sulphate, alkali-aggregate reaction, chloride or carbonation are major destructive effects. Under these conditions, performance of concrete will be affected negatively during service life.

Chloride-induced steel corrosion is one of the major worldwide deterioration problems for steel reinforced concrete structures. The high alkaline environment of good quality concrete forms a passive film on the surface of the embedded steel, which normally prevents the steel from corrosion. However, under chloride attack, pitting occurs over the passive film, and the steel spontaneously corrodes.

In this study, corrosion effect of chloride on embedded steel in silica fume added concretes was investigated. Different concretes were produced with different values of silica fume/total binder ratio, water/total binder ratio and total binder contents. At the age of ninety days the specimens were subjected to cycles of seven days in one molar NaCl solution and following seven days at aerial conditions. The resistivity, half cell potential and linear polarization measurements were carried out for every two weeks with a specially developed GECOR 8 testing instrument. Test results showed that addition of silica fume improves the durability properties of concrete in general.

Moreover, the specimens which started to corrode were ground and chloride contents were measured by using potentiometric titration method of different layers in order to define chloride concentration. Test results showed that addition of silica fume improves corrosion resistance of concrete in general.

1. GİRİŞ

Modern yapılarda uzun yıllardır kullanılan ve gelecekte de kullanılacak olan beton, gerekli koşullarda tasarlanıp imal edildiğinde uzun yıllar boyunca hizmet verebilen en ekonomik ve dayanıklı yapı malzemesidir. Bileşenlerinin kolay temin edilebilir olması ve taze iken istenilen şeklin verilebilmesi nedeni ile yaygın olarak kullanıma sahiptir.

Sertleştikten sonra çevre koşullarına ve yangına karşı dayanıklı hale gelen beton, servis ömrü boyunca mekanik, fiziksel veya kimyasal yollarla hasara uğrayabilir. Donma-çözünme, değişen nem koşulları, aşındırıcı yükler, asit, sülfat, alkali agrega reaksiyonu, klorür veya karbonatlaşma etkisi betona zarar veren en önemli etkenlerdir. Bu nedenle betonun servis ömrü boyunca performansı olumsuz olarak etkilenir.

Betonun en önemli özelliği, içinde gömülü olan donatı için koruyucu bir ortam oluşturmasıdır. Klorür ve/veya karbonatlaşma etkisi ile donatının korozyona uğraması sonucunda beton ve donatı arasında aderans kaybı ile birlikte donatıdaki hacim artışı nedeni ile paspayının çatlaması da söz konusudur.

Bu çalışmada silis dumanı katkılı olarak üretilen betonların klorür etkisinde korozyonu incelenmiştir. Üretilen tüm beton numunelerin yarısı su içerisinde diğer yarısı laboratuvar ortamında açıkta bekletilerek iki farklı kür koşulunun betonun donatı korozyonu oluşumuna karşı gösterdiği direnç üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla üretilen numuneler 1 M NaCl çözeltisi içerisinde ıslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutularak beton içerisine girişi doğal yöntemle hızlandırılan klorür iyonları nedeniyle çelik donatılar üzerinde oluşan korozyon, lineer polarizasyon yöntemini kullanan GECOR 8 adlı korozyon ölçüm aleti ile izlenmiş ve klorür etkisinde korozyon oluşumu incelenmiştir.

1.1 Beton Bileşenleri

Beton, kaba ve ince agregâ, çimento ve su ile birlikte kimyasal ve/veya mineral katkıların kullanılması ile üretilen kompozit bir malzemedir.

1.1.1 Agregalar

Hacimsel olarak betonun %60-%80' ini oluşturan agregalar mineral esastır ve ince ve kaba olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tane boyutu 4 mm' den küçük olanlar ince agregâ, 4 mm' den büyük olanlar da kalın agregâ olarak adlandırılmaktadır.

1.1.2 Çimento

Sertleşen betona mekanik mukavemetini sağlamak amacı ile bağlayıcı olarak kullanılan çimento, su ile karıştırıldığında, az veya çok akıcı niteliğe kavuşan, sadece suyun etkisiyle priz yapan, katılaştıran ve sertleşen ince taneli malzemedir. Son dönemlerde yaygın olarak ana bileşen olan portland klinkerinin yanı sıra, puzolanlar; silis dumanı, yüksek fırın cürüfları ve termik santral uçucu külleri ikincil bileşen olarak kullanılmaktadır.

1.1.3 Su

Karma suyu ile birlikte beton karışımına gelebilecek eriyik ve askıdaki çeşitli maddeler çimentonun priz sürelerini, betonun direncini ve işlenebilme yeteneğini etkilerler ve donatının korozyonuna yol açarlar. Beton karma suyundan istenen en temel nitelik içilebilir su olmasıdır [1].

1.2 Betonun Durabilitesi

Betonun durabilitesi kavramı, bir yapının servis süresi boyunca çevresel etkilere karşı dayanıklılığı olarak açıklanabilir. Yapıların uzun ömürlü olması sadece doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve imal edilmesine bağlı değildir. Aynı zamanda, yapının mantıklı bir zaman süreci içerisinde kalıcı denecek kadar uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az bakımı gerektirecek şekilde yaşlanması yavaşlatılmalıdır.

Her beton karışımı, maruz kalınacak koşullar, inşaat tasarımları ve yapısal kriterler göz önünde bulundurularak oranlanmalıdır. Malzeme seçiminde donma-çözünme,

sülfatlar, buz çözücü kimyasallar, asitler, değişen nem koşulları ve aşındırıcı yükler dikkate alınmalıdır. İlaveten, alkali-silika reaksiyonu (ASR), alakli-karbonat reaksiyonu ve termal etkiler sebebi ile oluşabilecek genleşmelerin önlenmesi için uygun malzemeler seçilmelidir.

Dayanıklı bir beton tasarımının temel koşulu portland çimentosu ve uygun agrega seçimi (oran, sertlik, gradasyon, şekil, boyut ve faz kompozisyonu) ile birlikte puzolanların, granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve kimyasal katkıların kullanımudur.

Malzemelerin ve kimyasal katkıların seçiminde, betonun durabilitesini artıracak seçimler yapılmalıdır. Hava sürükleyici katkılar donma-çözünme dayanımını artırırken, yüksek sınıf akışkanlaştırıcılar su/çimento oranının düşürecekler.

Tüm bu değişiklikler muhtemel rötre çatlaklarını azaltacak ve betonun geçirimliliğini düşürecekler. Dolayısı ile agresif kimyasal etkenlerden betonun korunması, karbonatlaşma oranının azaltılması, korozyon dayanımının iyileştirilmesi için faydalı olacaktır. Bununla birlikte korozyonu yavaşlatan, ASR oluşumunu azaltan, su geçirimliliğini ve rötreyi azaltan kimyasal katkıların kullanımı da önemli yararlar sağlayacaktır [2].

1.3 Puzolanlar

Yüksek oranda silis içeren, kendi başına çok az veya hiç bağlayıcılık özelliği olmayan, ince taneli, betona toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %20 ila %70'i gibi yüksek oranlarda katılan ve alkalilerle kimyasal tepkimeye giren malzemelere puzolan denir.

Puzolanlar doğal ve yapay olarak ikiye ayrılır. Doğal puzolanlara tras olarak adlandırılmaktadır ve farklı bölgelerden elde edilebilir. Yapay puzolanlara örnek olarak pişmiş kil, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı verilebilir.

1.3.1 Uçucu kül

Kömürle çalışan termik elektrik santrallerinin bacalarından toplanan bir atık ürünü olan uçucu kül, genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi nedeniyle puzolanik özellik gösterir. Çimento ve betonda mineral katkı olarak kullanılan uçucu kül, ince ve küresel taneleri sayesinde taze betonda işlenebilmeyi artırır; bununla birlikte

hidratasyon ısını da azaltır. Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur ve bu sayede çimento hamurundaki boşlukları doldurarak betona dayanıklılık kazandırır [3].

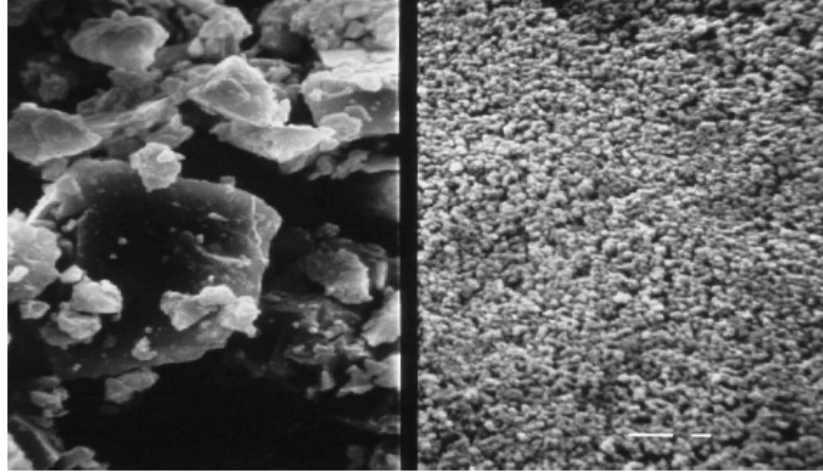
1.3.2 Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırınlarda yapılan demir üretimi sırasında açığa çıkan bir yan ürün olan YFC, doğadaki halinde bulunan ve demir üretiminde uzaklaştırılan silissi ve alüminli bileşiklerle birlikte kömürden de karışan bazı maddeler içerir. Ham demir üretiminde kullanılan demir filizi yüksek fırınlarda pişirildikten ve eriyik olarak dışarı çıkarıldıktan sonra aniden soğutularak granülleşir. Bu granüller camsı ve amorf yapıdadır [3].

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ulaşılabilirlik ve maliyet açısından mineral katkılar arasında en fazla tercih edilenlerdir.

1.3.3 Silis dumanı

Silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak, elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kok kömürü ve odun parçacıkları ile redüksiyonu sonucunda elde edilen çok ince taneli tozdur. Çok ince taneli ve yüksek oranda amorf silis içermesi dolayısı ile 1980' li yıllardan bu yana etkin bir puzolan olarak kullanılmaktadır. Artan tane yüzeyi nedeni ile daha fazla su ihtiyacını ortaya çıkaran silis dumanının betonda katkı olarak kullanılmaya başlaması beton akışkanlaştırıcıların kullanıma girmesiyle birlikte olmuştur. Ülkemizde Antalya'da bulunan, Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir [5].



Şekil 1.1 : Aynı derecede büyütülmüş Portland çimentosu (solda) ve silis dumanının(sağda) görüntüsü

1.3.3.1 Silis dumanı kullanımının beton üzerindeki etkileri

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılığın beklendiği projelerde tercih edilmektedir. Bunlar genelde; yerinde dökülmüş prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanlar, erozyon vb. etkilere maruz hidrolik ve deniz yapıları, onarım ve güçlendirmede kullanılan yapısal tamir harçları vb. alanlardır.

Portland çimentosuna ait özgül yüzey tayini Blaine metodu ile yapılabiliyorken, Portland çimentosuna göre 100 kat daha ince taneli olan silis dumanının özgül yüzey tayini Azot (BET) metoduna göre yapılabilmektedir. Toplam bağlayıcı miktarının %15'inin silis dumanından meydana gelmesi durumunda her çimento tanesine yaklaşık 2 milyon silis dumanı tanesinin karşılık geldiği belirlenmiştir. Silis dumanının betonda kullanıldığında sağladığı fiziksel ve kimyasal katkının temeli tane boyutunun çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır [6].

Silis dumanı çimento taneleri arasında kalan boşlukları doldurarak beton dayanımını artırır. Bu etkinin nedeni çimentonun hidratasyonu esnasında ortaya çıkan serbest kireci bağlayarak kalsiyum silikat hidrateyi (CSH) oluşturmasıdır. Serbest kirecin bağlanması ile çimento hamuru daha yoğun mikro boşluk yapısına sahip olur, ayrıca ince silis dumanı taneleri agrega-çimento hamuru ara yüzeyini güçlendirerek daha yüksek dayanımlara ulaşabilen betonlar elde edilmesini sağlar [5, 7, 8].

Betonun zararlı etkenlere karşı dayanıklılığı önemli ölçüde geçirimsizliği ile ilişkilidir. Silis dumanı çimento hamurlardaki gözenekleri doldurmak sureti ile geçirimsizliği azaltmaktadır.

Klorür çözeltisi içinde bekletilen harç numunelerinin incelendiği bir çalışmada silis dumanı katkısının geçirimsizlik üzerine olumlu etkisi görülmüştür [5].

Yayımlanmış çalışmalar incelendiğinde, klorür etkisinde korozyon başlama süresinin, silis dumanlı betonlarda normal betonlara göre çok daha uzun olduğu ve bu sürenin betonun boşluk suyu kimyasından daha fazla bileşimi ve boşluk oranına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır [9-11].

Silis dumanı miktarına bağlı olarak betondaki klorür geçirimsizliğinin miktarları aşağıdaki Çizelge 1.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 1.1 : Betonların klorür geçirimsizliğine silis dumanının etkisi

Beton Türü	Klorür Geçirimsizliği	Elektrik Yüğü (coulomb)
Normal beton (s/ç>0,6)	Fazla	4000 den fazla
Normal beton (s/ç=0,4-0,5)	Orta	2000-4000
Normal Beton (s/ç<0,4)	Az	1000-2000
%5-15 silis dumanlı, düşük s/b orantılı beton	Çok az	100-1000
%15-20 silis dumanlı, düşük s/b orantılı beton	İhmal edilebilir	100’ den az

Puzolan içeren betonlar yetersiz kür koşullarından, normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla etkilenmektedirler. Bununla birlikte silis dumanı katkılı betonda kür koşulları da geçirimsizlik için önemli bir etkidir. Aynı bileşime sahip, aynı oranda silis dumanı içeren iki ayrı betondan kür uygulanmış olanında çok daha düşük seviyelerde kılcal su emme ve klorür geçirimsizliği görülmektedir. Bu durum özellikle silis dumanı oranı arttıkça kendini daha da fazla göstermektedir. Bu nedenle silis dumanı oranı arttırıldıkça, kür koşullarına daha çok özen gösterilmelidir.

2. BETONA GÖMÜLÜ ÇELİK DONATININ KOROZYONU

Korozyon, metalin kendi çevresindeki elektrokimyasal bir reaksiyon ile indirgenmesi olarak tanımlanmaktadır. Termodinamik kanunlarına göre yüksek enerjili durumdan düşük enerjili duruma geçiş için eğilim vardır. Bu eğilim nedeni ile metaller de indirgenirler ve korozyon meydana gelir [12, 13].

Genel olarak, uygun karışım oranına sahip, iyi sıkıştırılmış ve kürlenmiş iyi kaliteli beton, çelik için mükemmel bir koruyucu tabaka oluşturur. Fiziksel koruma için beton tabaka bariyer oluştururken, sodyum ve potasyum içeren çimento ve hidrasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksit varlığında kimyasal koruma da sağlanmış olur [14-16]. Tipik bir betonun (12,5-13,5) yüksek pH değerleri demiroksitlerin termodinamik olarak kararlı olduğu aralıktadır. Bu nedenle de metal yüzeyinde koruyucu filmin oluşumu sağlanmış olur. Ancak koruyucu beton tabakası mükemmel değildir çünkü gözenekli bir yapıya sahiptir ve içindeki mikro çatlaklardan ilerleyen agresif kimyasallar dolayısı ile bu pasif tabaka zarar görür. Bu pasif tabaka en yaygın olarak klorür iyonlarının filme nüfuz etmesi ve gözenekteki çözeltinin karbonatlaşma sonucu (CO_2) nötralize olması ile iki şekilde zarar görür.

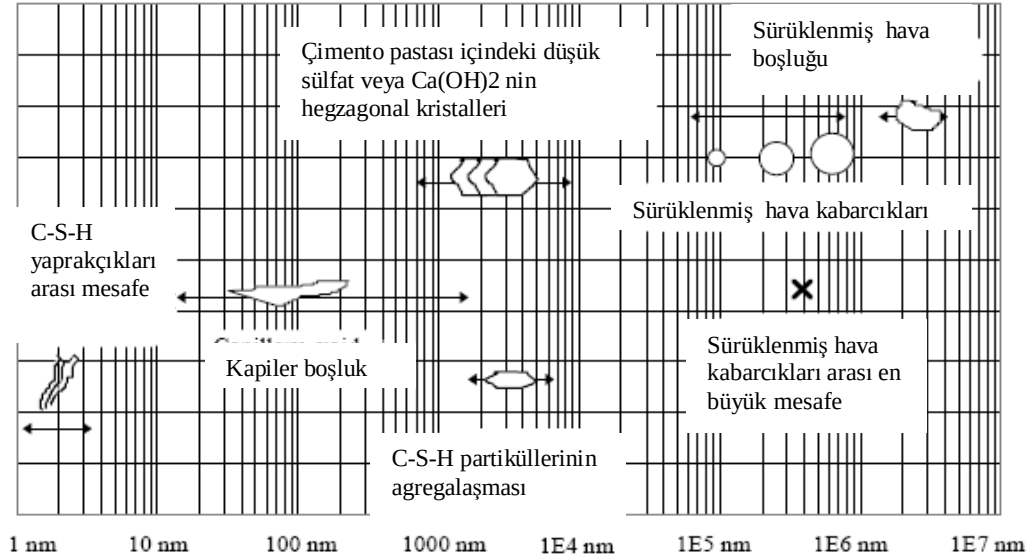
Klorür etkisindeki çelik korozyonu, çelik ile güçlendirmiş beton yapılar için dünya çapındaki en yaygın hasarlardan birisidir. Yüksek alkaliniteye sahip iyi kaliteli beton, içinde gömülmüş olan çelik yüzeyinde pasif bir film oluşturarak korozyonun ilerlemesini önler [15]. Ancak klorür etkisinde, pasif tabaka zarar görür ve çelik korozyona uğrar. [16, 17]. Oluşan pas tabakasının hacmi, demirden 4-6 kat fazladır. Bu hacim artışı, çeliği örten tabaka içerisindeki çekme gerilmelerini artırır ve çekme dayanımı aşıldığında betonda çatlama, delaminasyon ve parça atmaları oluşur. Donatıyı örten tabaka kaybına ilaveten betonarme eleman çelik ve beton arasındaki bağ kaybı ve donatı çapındaki azalma nedeni ile yapısal bir hasar görebilir [18].

2.1 Beton İçerisinde Korozyon Gelişimi

Beton, içerisinde farklı miktarlarda ve dağılımda katı fazlar, gözenekler ve mikro çatlaklar içeren heterojen ve karmaşık bir yapıya sahiptir [19]. Çevresel nem, boşluk yapısı ve boşluk boyutu dağılımına göre farklı miktarlarda su hidrate imento pastası içerisinde yer alabilir. Korozyon etkenlerinin (su, oksijen ve çeşitli iyonlar), korozyon ürünlerinin varlığı ve taşınması imento pastasının bu yapısı ile ilişkilendirilmektedir.

Gömülü eliğin korozyon açısından aktif veya pasif olup olmayacağı boşluk çözeltisinin yapısına göre belirlenmektedir. Yapılan araştırmalara göre, imento içerisinde sodyum veya potasyum oksitlerin varlığı ile birlikte hidrasyon sırasında oluşan kalsiyum hidroksit, normal Portland imentosunun boşluk çözeltisinin pH değeri 13 civarındadır. Bu pH seviyesindeki çözelti, çözünmeyen demir oksitlerin termodinamik olarak kararlı olduğu ve elik donatı üzerinde pasif bir film oluşturabileceği bir değerdedir. Maalesef betonun bu pH değeri karbonatlaşma ve yıkanma nedeni ile düşebilir.

Çimento pastası tarafından belirlenen boşluk yapısı ve boyut dağılımı ile birlikte bu boşlukların birbiri ile olan bağlantısı, pasif tabakanın korunması için gerekli oksijen ve nemin varlığını etkiler. Bununla birlikte, gömülü çeliğin korozyonuna neden olan en nmeli iki etken olan klorür iyonu ve karbon dioksitin penetrasyon oranını da belirler. Hidrate imento pastasındaki katı fazın ve boşlukların tipik boyutları şekil 2.1' de verilmiştir. Boşluk boyut dağılımı esas olarak su/imento oranı ve hidrasyon derecesi tarafından etkilenmektedir.



Şekil 2.1 : Hidrate çimento pastası içindeki unsurlar ve boyutları

Beton içerisindeki çeliğin korozyonu beton elektrolitin iyonik iletkenliğine bağlıdır, nem ve sıcaklığı, ve örtücü beton tabakanın kalitesi korozif maddelerin dışarıdan içeriye taşınmasında ilgilidir.

2.1.1 Elektrolit olarak beton

Beton içerisindeki çeliğin korozyon süreci, elektrokimyasal bir reaksiyon olarak düşünülür ve sıvı elektrolitler için geliştirilmiş bu temel teoriye göre yürüdüğü kabul edilmektedir [20, 21]. Bununla birlikte, beton içindeki çeliğin korozyonu “beton elektrolit” tarafından belirlenen bir çok karakteristik farklılıklara sahiptir. Bu farklılıklar betonun boşluk yapısına ve servis süresince maruz kaldığı dış koşullara göre etkilenmektedir.

Boşluk suyu ve hava ile dolu gözenekler, korozif etkenler ve elektrolit için bir yol oluştururlar.

Buhar veya kısmen dolu boşluklardaki suya ilave olarak su hidrate çimento pastası içerisinde aşağıdaki şekillerde mevcut olabilir.

Kapiler su, en yaygın olarak boşluklarda bulunur.

Absorbe su, yüzeye yakındır ve su molekülleri hidrate çimento pastası içerisinde tutulmaktadır. Çimento pastasının nemi %30’ a indiğinde absorbe suyun büyük bir kısmı kuruma nedeni ile buharlaşacaktır.

Katmanlararası suyu, hidrojen bağları ile bağlanmış olarak C-S-H ile gelen sudur. Çok iyi bir kuruma (%11 bağıl nem altında) oluştuğunda kaybolur.

Kimyasal bağlı su, kuruma ile kaybolmayan, çeşitli hidrate üründe bağlı sudur.

Beton çok kuru olmadığı durumlarda, elektriksel olarak iletken ve korozif bir elektrolit olarak düşünülebilir. Ancak fizikokimyasal özellikleri nedeni ile bilinen sıvı elektrolitten farklıdır. Betonun elektrokimyasal özellikleri sadece içi yapısına göre değil, dış etkenlere (yerleşim, mevsimsel hava koşulları vb.) göre de değişiklik gösterir. Bu nedenle servis ömrü boyunca elektriksel iletkenliği de farklılık gösterir.

2.1.2 Betonun korozyon aktivitesi

Beton içerisindeki çeliğin korozyonu beton elektrolitin iyonik iletkenliğine bağlıdır. Nem, sıcaklık ve örtücü beton tabakanın kalitesi korozif maddelerin dışarıdan içeriye taşınmasında ilgilidir.

Betonun korozivitesi için en iyi ölçüm iletkenliktir, genellikle öz direnç olarak belirtilir. Düşük beton rezistivitesi yüksek korozif aktiviteyi işaret eder. Betonun rezistivitesi genel olarak gözenek suyundaki tuz miktarı, doygunluk derecesi ve sıcaklık tarafından belirlenir. Betonun rezistivitesi farklı koşullarda değişkenlik gösterebilir [22].

Betondaki kapiler boşluk sisteminde bulunan su ve hava korozif elektrolit olarak davranır. Korozyonun oluşabilmesi için kesin bir miktar su bulunması gerekmektedir. Kural olarak, katodik reaksiyon için oksijenin olması gereklidir. Gözenek bir kısmı su ile dolu ise, oksijen gaz halde difüzyonla çelik yüzeyine ulaşabilir ancak gözenek su ile tamamen dolu ise oksijen çeliğe sadece sıvı fazda ulaşabilir ve bu da havadakine göre 4 kat daha uzun bir süre alır [23]. Betonun nemi %80' den % 4'e düşürüldüğünde oksijen iletkenlik katsayısı 15 kat artar [24]. Betondaki nem arttığında, iletkenlik arttığı için korozyon hızı da artacaktır. Betonun nemi çok fazla arttığında korozyon hızı da azalan oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak hızlı bir şekilde düşecektir.

Korozyona neden olan klorür iyonu gibi maddelerin betona penetrasyonu iki yoldan olur; betonun doygunluğuna bağlı olarak kapiler hareket veya iyonik difüzyon [25]. Beton yarı ıslak-doygun durumda ise hareket öncelikle iyonik difüzyon yolu ile

gerçekleşir. Beton kuru-yarı kuru ise iyonlar kapiler yolla hareket edebilirler ve kapiler yolla iyon penetrasyonu iyonik difüzyonla penetre olandan hızlıdır.

2.2 Elektrokimyasal Korozyonun Mekanizması

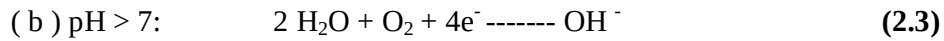
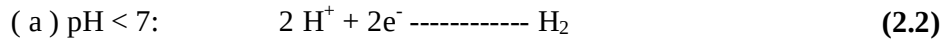
Temel korozyon hücresi üzerinden gidildiğinde, elektrokimyasal korozyonda, metal/sıvı arayüzünde oluşan iki farklı reaksiyon olduğu kabul edilmektedir. Elektron üreten anodik reaksiyon (oksidasyon) ve elektron kullanan katodik reaksiyon (redüksiyon). Temel korozyon hücresini oluşturan 4 bileşen vardır:

Anot, genellikle nötr atomların serbest iyonlar oluşturmak için elektron kaybetmesi nedeni ile korozyona uğrar. Bu iyonlar çözeltide kalabilir veya çözünmeyen korozyon ürünleri oluşturabilir. Bir metalin korozyonu basitleştirilmiş olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:



Alınan elektron sayısı atoma ait Valens elektronlarından gelmektedir. Demir için, z 2 dir.

Katot, katot reaksiyonunda anot reaksiyonunda oluşan elektronlar kullanılmalıdır. Çözeltinin pH sına göre katotta oluşabilecek iki basit reaksiyon vardır.



Elektrolit, elektriği iletmesi gereken çözeltiye verilen isimdir. Çözeltide katyonlar anodik bölgeden katodik bölgeye, anyonlar da ters yönde hareket ederler.

Elektriksel bağlantı, anot ve katot korozyon hücresi içerisinde elektriksel olarak bağlanmış olmalıdır.

Basit korozyon hücresi içerisindeki bu dört bileşenden birinin eksikliği korozyon reaksiyonunu durduracaktır.

2.3 Beton İçindeki Çelik Korozyonunun Prensipleri

Beton içindeki çeliğin korozyonu elektrokimyasal bir işlemdir. Bu sistem anot, katot, elektriksel iletken ve bir elektrolitten oluşur. Anot ve katot arasındaki potansiyel

farkı, çelik korozyonu için elektriksel bir güç meydana getirir. Genellikle bu işlem birincil elektrokimyasal süreç ve ikincil elektrokimyasal süreç olarak ikiye ayrılabilir.

2.3.1 Birincil elektrokimyasal süreç

Beton içindeki çelikte, klorür iyonları tarafından pasif film indirgendiğinde veya karbonatlaşma nedeni ile pH azaldığında anotdaki metalik Fe, demir iyonları Fe^{2+} oluşturacak şekilde oksidasyona uğrar:



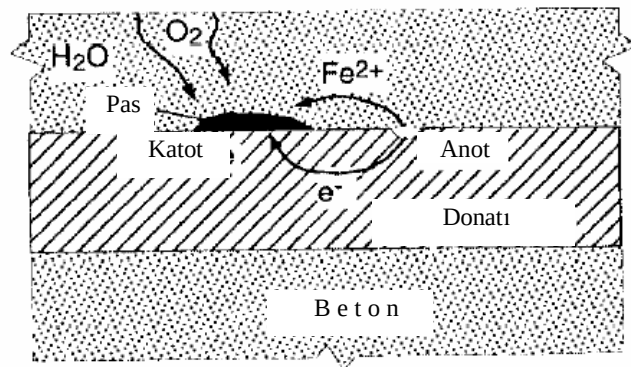
Anottan salınan elektronlar çelik boyunca Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi katodik alana doğru akarlar.

Yukarıdaki reaksiyon başlangıçta, çözünmüş oksijenin katodik reaksiyonu tarafından dengelenmektedir.

(O_2) den hidroksil iyonlarına (OH^-):



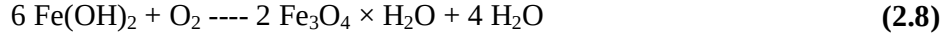
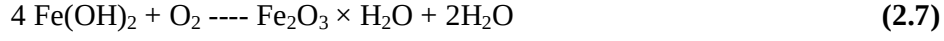
Anodik ürün olan Fe^{2+} katodik olarak oluşturulan hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek demir hidroksit ($Fe(OH)_2$) oluşturan çevrimi meydana getirir:



Şekil 2.2 : Donatının anot kısmındaki demirin çözünüp katotta pas oluşturması

2.3.2 İkincil elektrokimyasal süreç

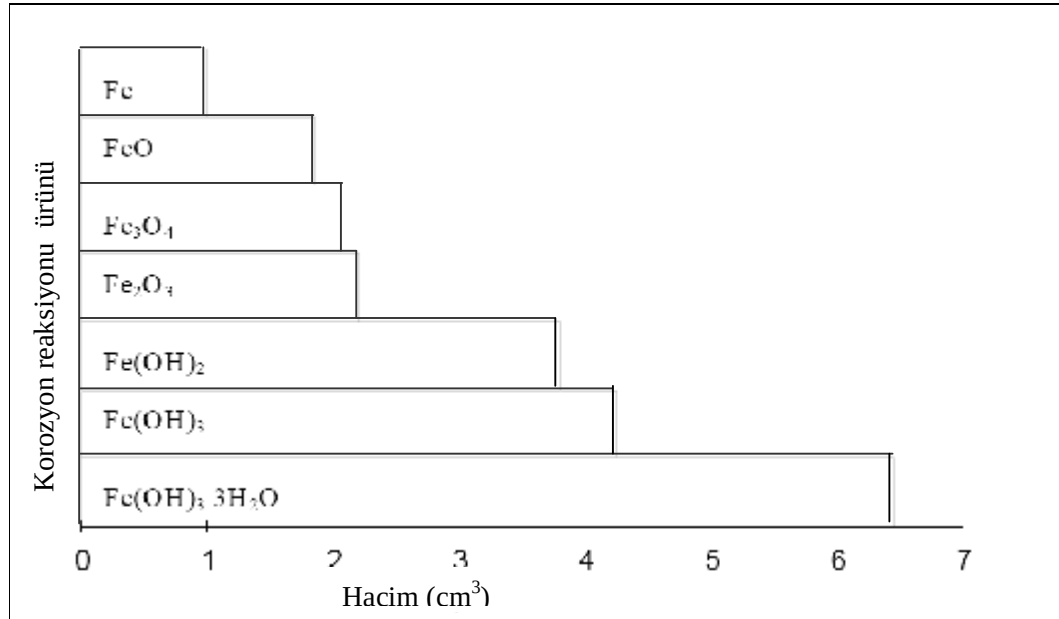
Daha ileri reaksiyonlarda $\text{Fe}(\text{OH})_2$, kırmızı-kahve pas olarak da bilinen hidrate demir okside ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$) ve yeşil hidrate magnetit ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \times \text{H}_2\text{O}$) tarafından oluşturulan siyah magnetite (Fe_3O_4) dönüşebilir:



Demir üzerindeki Hacim (cm^3) yapısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir



m, n ve p değerleri, çözeltinin pH değeri, oksijen miktarı ve nem içeriğine göre değişiklik gösterir. Şekil 2.2’ de de görüldüğü üzere pasın hacmi demire göre 4-6 kat daha fazladır ve çatlama, parça kopmalarına neden olacaktır.



Şekil 2.3 : Donatı hacmi ve korozyon reaksiyonu ürünü arasındaki ilişki

2.4 Beton İçindeki Çeliğin Korozyon Başlangıcı

Yüksek alkaliniteye sahip iyi kaliteli beton, içinde gömülmüş olan çelik yüzeyinde pasif bir film oluşturarak korozyonun ilerlemesini önler. Betonun fiziksel özellikleri

yeterli olmadığında veya bir şekilde CO₂ gibi gazların ve SO₃, Cl gibi iyonların girişi engellenemediğinde, ya kimyasal koruyuculuğu sağlayan alkalinitenin ana bileşeni olan Ca(OH)₂' nin karbonatlaşarak bazikliğini kaybetmesiyle ya da klorür iyonlarının doğrudan etkisiyle pasivasyon tabakası hasar görür.

Fiziksel ve ardından kimyasal koruyuculuğun ortadan kalkmasıyla çelik üzerindeki pasif tabakanın varlığını sağlayan ortam kaybolmuş olur. Pasivasyon tabakasının yok olmasıyla başlayan korozyon oluşum hızını belirleyen etkenlerin en önemlileri: katodik bölge civarında oksijen konsantrasyonu ve elektrolit görevi gören betonun elektriksel direncini etkileyen çelik etrafındaki nem ve sıcaklık durumudur.

Beton içindeki çeliğin pasivitesinin bakımı için yüksek pH ve su ve oksijen gerekmektedir. Betonarme yapıdaki çeliğin korozyonuna neden olan iki ana neden vardır. Bunlar karbonatlaşma nedeni ile oluşan korozyon ve klorür nedeni ile oluşan korozyondur.

2.4.1 Karbonatlaşma nedeni ile oluşan korozyon

Betonarme yapılar sürekli olarak atmosferdeki karbondioksit maruz kalırlar. Zayıf asidik yapıdaki sulu çözelti içindeki karbondioksit varlığında, çimento hamurundaki portlandit (Ca(OH)₂) ve CSH, gibi değişik hidratlar karbondioksit ile reaksiyona girebilirler ve karbonatlaşabilirler.



Karbonatlaşma sonucunda pH değeri düşer ve çeliği saran koruyucu tabaka ortadan kalkar [25, 26]. Karbonatlaşma oranı esas olarak beton kalitesi tarafından belirlenir çünkü bu durum çimento tipi, çimento oranı ve su/çimento oranından etkilenmektedir. Betonun doygunluğu da karbonatlaşma oranı için önemli bir faktördür çünkü karbondioksit beton içerisine gaz fazda geçer. Tamamen doygun betonda karbonatlaşma oranı çok düşüktür veya tamamen kuru bir betonda karbonatlaşma sonucu korozyon gerçekleşmez [28].

2.4.2 Klorür etkisinde oluşan korozyon

Yapılan birçok çalışmada [15, 29], betonarmedeki klorür varlığında yeterli oksijen ve nem olduğunda donatı korozyonuna neden olan reaksiyonun başladığı belirtilmiştir. Klorür nedeni ile oluşan korozyon beton içindeki çelik donatıda en yaygın ve hasar verici nedendir.

Beton içerisinde klorür iyonlarının oluşmasına iki neden vardır [28].

Betonu oluşturan malzemelerdeki iç kaynaklar. Taze beton karışımındaki malzemeler (su, çimento ve agregalar) klorür açısından kirli ise klorür iyonları içerebilir. Kalsiyum klorür gibi bazı beton karışımları da klorür iyonları içerir.

Deniz suyu veya buz çözücü tuzların varlığı nedeni ile dış kaynaklar. Buz çözücü tuzlar, kış şartlarında karayollarında kullanılır. Klorür iyonları için en yaygın kaynaktır. Klorür iyonları özellikle deniz suyunda mevcuttur bu nedenle deniz suyuna maruz yapılar da klorüre maruz kalır. Klorür iyonları yapıya kapiler yoldan iyonik difüzyon ile penetre olurlar.

2.4.2.1 Klorür etki mekanizması

Klorür iyonları, pasif tabakaya penetre oluyor, oksijenle yer değiştiriyor ve iletkenliği ve çözünürlüğü artırıyor. Klorür iyonlarının korozyon nedeni ile oluşan çözünebilir demir (II) klorür komplekslerinin kompleks oluşturabileceği önerilmiştir. Son olarak oluşan demir klorür kompleks iyonu hidroksil iyonları ile Fe(OH)_2 çözeltisi oluşturur ve klorür iyonları serbest kalarak tekrar kompleks oluşturmak üzere korozyon reaksiyonunda katalist olarak rol alır.

2.4.2.2 Eşik klorür konsantrasyonu

Karbonatlaşmamış betonda donatının korozyonu ancak beton içerisinde çeliğe temas eden klorür iyonları eşik değere ulaştığında mümkündür. Korozyonu başlatmak için, çimento içerisindeki trikalsiyum alüminat ile reaksiyon yapmış halde eşik klorür konsantrasyonunun üzerindeki miktarda klorür (pasif tabakayı yıkmak için gerekli minimum klorür konsantrasyonu) gerekmektedir. Klorür iyonlarının bu eşik konsantrasyonu kesin değildir çünkü beton kalitesi (w/c oranı, karışım oranı, çimento tipi) de dahil olmak üzere, betonun bağıl nemi ve sıcaklığı, gözeneklerdeki çözeltinin ve sülfatlı çözeltinin pH' sına göre değişiklik gösterir [30, 31].

Eşik değerin yukarıdaki parametrelere göre değişiklik göstermesi yanında çelik yüzeyine ulaşabilen oksijen miktarı ile ilişkili olan donatının elektrokimyasal potansiyelinin etkisi çok büyüktür. Bununla birlikte, oksijenin donatıya kolaylıkla ulaşabildiği atmosfere maruz kalan yapılarda klorür konsantrasyonu çok düşük olsa bile korozyonu başlatmak için yeterlidir. Deniz suyu içindeki veya betonun suya doygun olduğu durumlarda korozyonun başlaması için daha yüksek klorür konsantrasyonunun olması gerekmektedir, çünkü oksijenin iletimi engellenmiştir ve donatının potansiyeli oldukça düşüktür [32]. Bununla birlikte, köprü tabliyeleri gibi atmosfere maruz kalan yapılarda eşik değerlerinde önemli dağılımlar vardır.

Genel görüşe göre, sadece beton gözeneklerindeki suda mevcut olan serbest çözülmüş klorür iyonları korozyon reaksiyonuna dahil olabilir.

2.5 Korozyon Ölçüm Yöntemleri

Hasar dış yüzeyden gözle görülene kadar çeliğin korozyonunu tesbit edilememektedir. Bu hasarlar, pas lekeleri, çatlaklar ve parça kopmaları şeklinde olabilir. Yapının korozyonuna bağlı servis ömrünü tesbit edebilmek ve donatının korozyon aktivitesini, korozyon oranını ölçebilmek için tahribatsız yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Beton yapısının özel elektrolitik özelliklerine bağlı olarak doğru ölçüm yapan aletlerin geliştirilmesi zordur ancak donatının korozyon ölçümü için yarı-hücre potansiyeli, lineer polarizasyon teknikleri ve AC Impedans gibi yöntemler başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

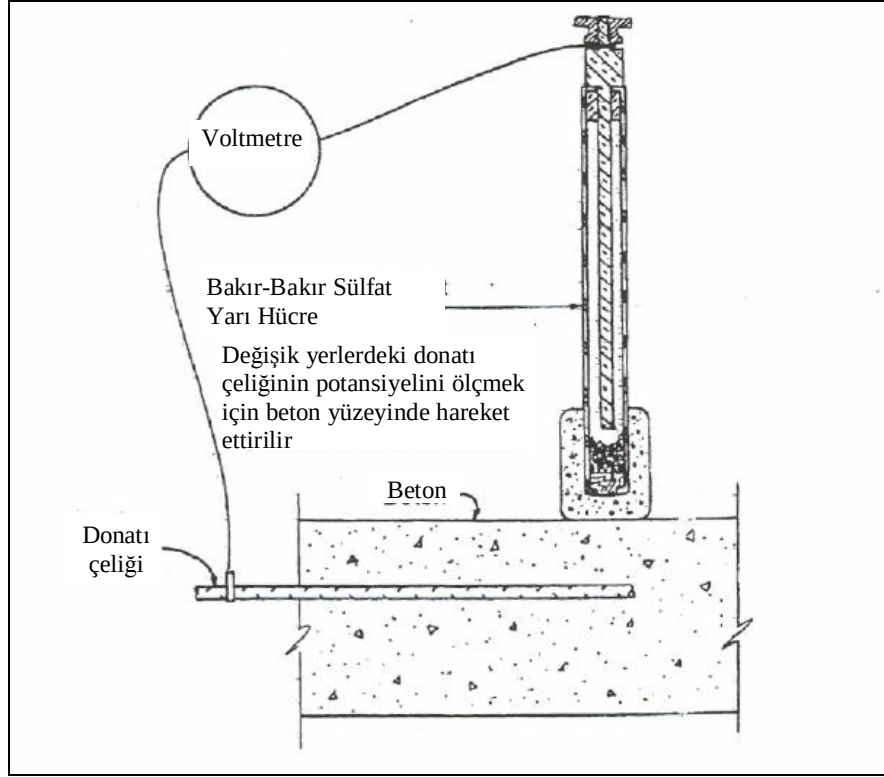
2.5.1 Elektrokimyasal yöntemler

Donatı korozyonu ile ilgili çalışmalarda en yaygın yöntem elektrokimyasal ölçüm yapılmasıdır. Bu yöntem beton içerisindeki çeliğin korozyon açısından davranışını hasarsız olarak inceleme olanağı vermesinin yanında belirli bir süre içinde donatının davranışının izlenmesini de sağlar.

2.5.1.1 Yarı hücre potansiyeli

Korozyon prosesi elektriksel potansiyel oluşturur ve yarı hücre metodu bu potansiyeli belirleme ve derecelendirme olanağı sağlar. Bu potansiyel, çelik donatı ile bir referans elektrod arasındaki voltaj farkının yüksek dirençli bir voltmetre yardımı ile ölçülmesiyle bulunur (Bkz. Şekil 2.4). Metod ve ölçüm ekipmanı ASTM

C 876' da belirtilmiştir. Ölçülen korozyon potansiyeli değerleri, homojen korozyon oluşumu söz konusu olmadığı sürece korozyon hızı hakkında bilgi vermez. Okunan değerler ne kadar düşükse, korozyon olasılığı da o kadar yüksektir. Beton yüzeyi ile donatı arasındaki kalınlığı yani beton örtüsünü dikkate almayan bu deney metodu betonun herhangi bir servis süresinde kullanılabilir [7].



Şekil 2.4 : Bakır-bakır sülfat yarı hücre devresi.

Yarı hücre potansiyeli deneyinde çoğunlukla kullanılan birkaç referans elektrotlarıyla yapılan ölçümlerin ASTM C 876' ya göre yorumlanmasında esas alınan ölçütler Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bu durumda referans elektrot bakır/bakır sülfat yarı hücresidir.

Çizelge 2.1 : Korozyon potansiyeli belirlenmesinde kullanılan referans elektrod değerleriyle korozyon riski arasındaki ilişki [33].

Bakır/Bakır Sülfat (CSE)	Korozyon Olasılığı
$>(-200\text{mV})$	Korozyon olasılığı %10
$(-200\text{mV}) - (-350\text{mV})$	Korozyon belirgin değil
$<(-350\text{mV})$	Korozyon olasılığı %90
$<(-500\text{mV})$	Şiddetli korozyon durumu

2.5.1.2 AC empedans yöntemi

Bu teknik, çalışan elektrod olarak görev yapan donatıya doğrusal sinyal yerine alternatif sinyal uygulama temeline dayanır. Düşük frekans değerlerinde ölçüm özellikle çok düşük korozyon hızlarını tespit etmeye imkan verir. Empedans ölçümleri belirli bir frekans aralığında değişen ve genellikle 10 mV veya daha düşük değerlerde olan küçük bir sinüzoidal voltaj sinyalini korozyon sistemine uygulayarak buna karşılık gelen devre akımını ölçmeyi hedefler. Bu frekans aralığı beton için genellikle 0.1 mHz ile 100 kHz arasında kalmaktadır. Korozyon hızı belirlenmesinde AC Empedans yöntemi doğrusal akım yöntemlerinin sağladığı tüm avantajlara sahip olmakla birlikte, kullanılan düzeneğin çok karmaşık ve maliyetinin yüksek oluşu nedeni ile çok fazla yaygınlaşmamıştır.

2.5.1.3 Lineer polarizasyon yöntemi

Lineer polarizasyon terimi, polarizasyon eğrisinin lineer bölgelerine işaret etmektedir ve iyonik bir çözelti içerisindeki korozyona uğrayan metalin potansiyelindeki değişiklikler ile ilişkilendirilmektedir. Prensip olarak, beton içerisindeki donatıya istenilen sabit potansiyeli sağlayan bir potansiyostat vasıtasıyla düşük değerli bir elektrik akımı verilerek donatının polarize edilmesi sağlanır. Donatıda polarizasyon genellikle E_{corr} olarak tanımlanan korozyon potansiyeli değerinden itibaren Tafel bölgesi olarak da adlandırılan ± 10 mV potansiyel aralığında gerçekleşir. Bu sınırlar içerisinde uygulanan elektrik akımı ile elektrot potansiyeli arasındaki ilişki neredeyse doğrusaldır. Elektrik akımı ile Elektrod potansiyelinin doğrusal olarak değiştiği bölgenin eğimi, polarizasyon direnci (R_p) olarak tanımlanmıştır. Bu değer Stern-Geary bağıntısı yardımıyla korozyon akımı ile ilişkilendirilmiştir [34, 35]. Şekil 2.5’de verilen grafikte görüldüğü gibi ± 10 mV potansiyel aralığı dikkate alındığında (2.13), (2.14) ve (2.15) de verilen eşitlikler kullanılarak polarizasyon direnci (R_p) ve korozyon akım yoğunluğu değerleri hesaplanabilir.

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (2.13)$$

$$B = (b_a \cdot b_c) / 2,3(b_a + b_c) \quad (2.14)$$

$$I_{korr} = B / (R_p \cdot A_k) \quad (2.15)$$

Burada;

ΔE : Polarizasyon değişimi

ΔI : Akım değişimi

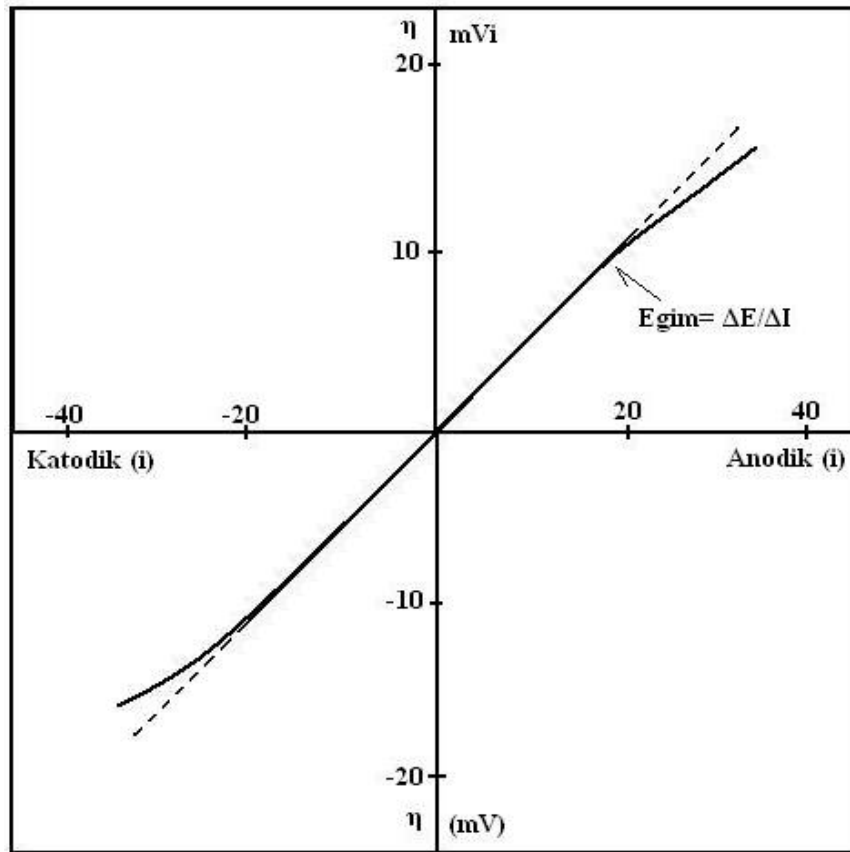
β_a : anodik tafel sabiti

β_c : katodik tafel sabiti

B : Stern-Geary sabiti (aktif paslanan çelikte 26 mV, pasif çelikte 52 mV)

I_{corr} : Korozyon akım yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)

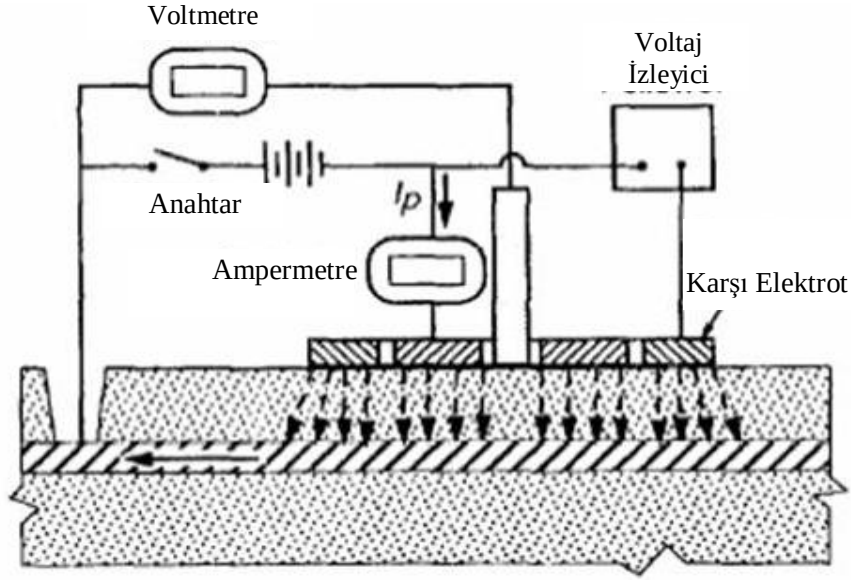
A_k : Donatının aktif olarak korozyona uğradığı alan.



Şekil 2.5 : Dış akıma karşı polarizasyon aşırı gerilimi.

Lineer polarizasyon ölçümü için Şekil 2.6'da gösterilen düzenek kullanılmaktadır. Bu düzenekte üç elektrod yer almaktadır. Bu elektrodlerden ilki yarı hücre elektrodu, ikincisi çalışan elektrod olarak adlandırılan donatı eliği, Üçüncü elektrod ise donatıya polarizasyon sağlayan karşı elektrottur [36].

Bu uygulamadaki en büyük sorun, karşı elektrodun akımından etkilenen donatı kesit alanının tam olarak bilinmemesidir. Üç elektrodlu yöntemde akımın çalışan elektroda ve karşı elektroda dikey çizgiler halinde geçtiği kabul edilir. Bu sebeple etkilenen donatı alanı hesaplanırken, donatı kesitinin çevresi ile karşı elektrodun altında kalan kısmının uzunluğu çarpılır. Yapılan matematiksel simülasyonlarda, bu varsayımın gerçeği yansıtmadığı, geçen akımın tam olarak karşı elektrodun altından geçmediği belirlenmiştir. Akım yolunu kontrol edebilmek amacıyla düzenek geliştirilmiş ve koruma halkası adı verilen ve karşı elektrodu çevreleyen bir düznek eklenmiştir. Yardımcı elektrod, karşı elektrod ile aynı potansiyel değerine sahiptir. Bu şekilde karşı elektrodan çalışan elektroda doğru geçen akım karşı elektrodun altındaki bölgede sınırlandırılmış ve akımın üniform olmayan yanal dağılımları azaltılmıştır [36].



Şekil 2.6 : Lineer polarizasyon ölçümünde kullanılan deney düzeneği.

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen korozyon akım yoğunluklarının irdelenmesi için kullanılan değerler Çizelge 2.2’de verilmiştir [36].

Çizelge 2.2 : Korozyon akım yoğunluğuna göre korozyon durumu [36].

Korozyon Akım Yoğunluğu	Korozyon Durumu
$I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasif Korozyon durumu
$0,1 \mu A/cm^2 < I_{corr} < 0,5 \mu A/cm^2$	Düşük Korozyon hızı
$0,5 \mu A/cm^2 < I_{corr} < 1,0 \mu A/cm^2$	Orta Korozyon hızı
$I_{corr} > 1,0 \mu A/cm^2$	Yüksek Korozyon hızı

2.5.1.4 İletkenlik ölçümü (özdirenç ölçümü)

Betonun içerisinde korozyonun meydana gelmesi için betonun içerisine penetre eden klorür iyonlarının anodik bölge ile katodik bölge arasında hareket etmesi gerekmektedir. Bu hareket betonun özdirenci ile ilişkilidir, yani daha az boşluklu bir yapıya sahip olan betonların özdirenci daha yüksektir. Çizelge 2.3’ de betonun özdirenci ile korozyon riski arasındaki ilişki verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Betonun özdirenci ile korozyon riski arasındaki ilişki [36].

Betonun Özdirenci (kΩ.cm)	Korozyon Riski
>100-200	İhmal edilebilir korozyon, çok kuru beton
50-100	Düşük korozyon hızı
10-50	Ortadan yükseğe doğru korozyon hızı
<10	Özdirenç korozyon hızını kontrol edemez durumda

2.5.2 Ağırlık kaybı yöntemleri (gravimetrik yöntemler)

Bu yöntem, tahribatlı yöntemlere dahildir ve test edilecek betonun ilk ağırlığı ile korozyona uğradıktan sonraki ağırlık farkının belirlenmesine dayanır (gravimetrik kayıp). Ağırlık farkının deney süresine oranı korozyon hızını verir. Detaylı test yöntemi ASTM G1’ de tariflenmiştir. Ağırlık kaybı yöntemi, laboratuvar numunelerinin korozyon tayini için en güvenilir yöntemdir ve diğer yöntemlerle elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde ve doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılır fakat çok fazla zaman almaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışması İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, üretilen betonların karışım özellikleri ve yapılan analizler detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Agregalar ve bağlayıcılar

Bu tez çalışmasında kırmataş-II, kırmataş-I, doğal kum ve kırma taş kumu kullanılmıştır. Agregalar TS 706 EN 12620 (2003) B referans eğrisine yakın bir karışım verecek şekilde aşağıdaki oranlarda karıştırılmıştır [37].

Çizelge 3.1 : Beton karışımında kullanılan agrega oranları

Doğal kum (%)	22
Kırmataş kumu (%)	23
Kırmataş I (%)	21
Kırmataş II (%)	34

Numuneler, Akçansa fabrikalarında TS EN 197-1' e uygun olarak üretilmiş CEM I 42,5 Normal Portland Çimentosu kullanılarak hazırlanmıştır ve mineral katkı olarak kullanılan silis dumanı belirlenen alt ve üst sınırlara göre ikameli olarak beton karışımlarına ilave edilmiştir. Silis dumanının değişen oranlarda çimento ile ikamesi sonucunda, betonun klorür etkisinde korozyon oluşumunun incelenmesi amacıyla yirmi farklı beton üretilmiştir. Beton üretiminde kullanılan silis dumanının analiz sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir [37].

Çizelge 3.2 : Silis dumanının kimyasal özellikleri.

Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,24
SiO ₂ (%)	95,7
H ₂ O (Nem İçeriği) (%)	0,53
Kızdırma Kaybı (%)	1,29

3.1.2 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

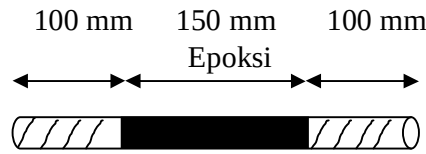
Beton üretimleri sırasında su ihtiyacını yüksek oranda azaltan, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan, modifiye edilmiş polikarboksilat esaslı SİKA Viscocrete-5W isimli süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcıya ait özellikler Çizelge 3.3’de verilmiştir [37].

Çizelge 3.3 : Kullanılan süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Tipi	Modifiye polikarboksilat esaslı sıvı
Yoğunluk (g/cm ³) (20°C)	1,11±0,02 kg/l
Renk	Açık kahverengi

3.1.3 Beton içerisinde gömülü çelik donatı

Lolipop numunelerin içerisine yerleştirilen 10 mm kesitli nervürlü çeliklerin ortadaki 150 mm’lik kısmı Sikadur-330 Epoksi Reçinesi ile kaplanmıştır [37].



Şekil 3.1 : Donatının epoksi ile kaplanması

3.2 Merkezi Karma Tasarım Yöntemi

Betonların karışım oranlarının belirlenmesinde Merkezi Karma Tasarım (MKT) isimli istatistiksel bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, merkezi x,y,z koordinat sistemlerinin 0,0,0 koordinatları olan bir küp oluşturulur. Her koordinat sistemi farklı bir değişken için kullanılır. İncelemede üretilecek bileşimlerin özellikleri ve sayısı da şu kurala göre belirlenir; k=3 adet bağımsız değişken için her değişkenin sınır değerlerinin tüm kombinasyonlarını temsil eden $2k=8$ adet faktöryal nokta, her bir değişkenin merkez noktasından $\pm\alpha$ kadar uzaklıkta iken diğerlerinin merkezde olduğu $2k=6$ adet “eksen” noktası ve deneysel hatanın belirlenmesi amacıyla merkez noktasının 6 kere tekrarlanmasından meydana gelen toplam 20 adet karışımdan oluşur.

3.3 Beton Karışımları

Alt ve üst sınır değerleri belirlenerek Merkezi Karma Tasarım Yöntemi yardımıyla 20 farklı karışım oranı elde edilmiştir [37].

Çizelge 3.4 : Betonlar için belirlenen değişkenler ve değişim aralıkları

Değişken	Alt Uç Değer	Alt Değer	Orta Değer	Üst Değer	Üst Uç Değer
Beton Dozajı	265,91	300	350	400	434,09
Silis Dumanı / Toplam Bağlayıcı	0,0	0,03	0,075	0,012	0,015
Su/ Toplam Bağlayıcı	0,45	0,48	0,53	0,58	0,61

Çizelge 3.4'deki değerler kullanılarak Çizelge 3.5'de verilen karışımlar hazırlanmıştır [37]. Üretilen 20 farklı betonun kodlamasında ilk bölüm karışımın numarasını, S harfi ise silis dumanı kullanılarak üretildiğini belirtmek amacıyla her numune kodunun başında kullanılmıştır. Kodlamanın ikinci bölümü kür koşulunu yani, H hava kürünü, S su kürünü temsil etmektedir. Kodlamada son olarak numunenin konulduğu kalıbı ve bu kalıptaki kaçınıcı numune olduğunu gösteren D harfi, içerisinde donatı bulunan silindir kalıpları temsil etmektedir. Örneğin; S14-H-D2 kodu, silis dumanı ile üretilen 14 no'lu karışıma hava kürü uygulandığını, numunenin donatılı olduğunu ve aynı özelliklere sahip 3 numuneden 2.'si olduğunu ifade etmektedir. Çizelge 3.5' de üretilen 20 adet karışımın açılımları, katkı miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Beton karışım oranları.

Numune No	Toplam Bağlayıcı kg/m ³	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
S1	350,00	0,075	0,53
S2	350,00	0,075	0,45
S3	434,09	0,075	0,53
S4	350,00	0,000	0,53
S5	350,00	0,151	0,53
S6	300,00	0,120	0,58
S7	350,00	0,075	0,61
S8	400,00	0,030	0,58
S9	400,00	0,120	0,58
S10	400,00	0,120	0,48
S11	265,91	0,075	0,53
S12	300,00	0,030	0,58
S13	300,00	0,030	0,48
S14	300,00	0,120	0,48
S15	400,00	0,030	0,48
S16	350,00	0,075	0,53
S17	350,00	0,075	0,53
S18	350,00	0,075	0,53
S19	350,00	0,075	0,53
S20	350,00	0,075	0,53

Çalışmada özdirenç, korozyon potansiyeli ölçümü ve lineer polarizasyon deneylerinde kullanılmak ve üçü havada üçü suda kür edilmek üzere 6 adet lolipop numune olarak adlandırılan ve içerisinde 10 mm çapında çelik gömülü olan silindir numune üretilmiştir [37].

3.4 Korozyon Deneyleri

3.4.1 Lineer polarizasyon, yarı hücre ve özdirenç ölçümü

Korozyon ölçümleri James Instruments Inc. tarafından üretilen ve Şekil 3.6'da gösterilen GECOR 8 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Lineer polarizasyon

ölçümlerinde, cihazın kuru betonlar için tasarlanmış içerisinde bulunan üç ayrı hücrede doymuş Bakır/Bakır-Sülfat çözeltisi içeren aparatı kullanılırken, korozyon potansiyeli ölçümleri ve betonun öz direncinin ölçülmesinde, içerisinde bakır çubuk ve haznesinde doymuş bakır/bakır sülfat çözeltisi bulunan diğer bir aparat kullanılmıştır. Bu deneyler için hazırlanan içine donatı gömülü beton numuneler, doksan günlük hava ve su kürünün ardından bir molar NaCl çözeltisine konulmuş ve bu andan itibaren dönüşümlü olarak yedi gün NaCl çözeltisinde, yedi gün havada bekletilmiştir. Ölçüm esnasında her iki apart ile beton arasına nemlendirilmiş sünger konulmuş ve cihazın üretici firması tarafından hazırlanan prosedür çerçevesinde ölçümler yapılarak cihazın hafızasına kaydedilmiştir. Yapılan ölçümlerden elde edilen verilen bilgisayar ortamına aktarılmış ve klorür konsantrasyonu-derinlik grafikleri çizilmiştir.



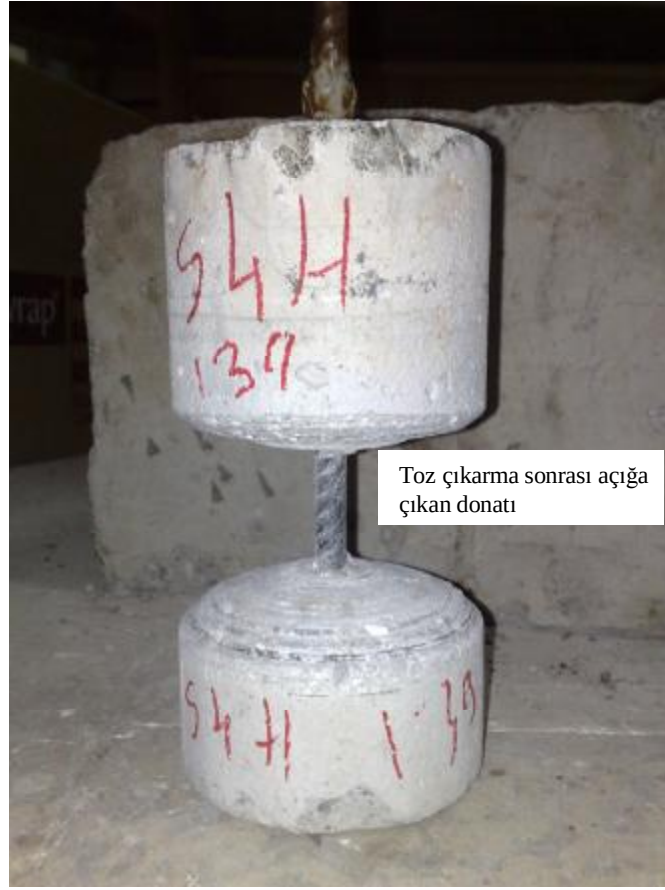
Şekil 3.2 : Korozyon ölçümlerinde kullanılan GECOR 8 Cihazı

3.4.2 Klorür içeriği analizi

Klorür etkisinde ıslanma kuruma çevrimine maruz kalan numuneler, korozyon ölçüm sonuçlarına göre değerlendirilerek toz çıkartılmak üzere çevrimden çıkartılmıştır. Çevrimden çıkartılan numuneler ZMM-SLIVEN firmasına ait Şekil 3.3’de gösterilen torna yardımı ile Şekil 3.4’de görüldüğü gibi toz çıkartma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.3 : Toz çıkartma işlemi için kullanılan torna cihazı



Şekil 3.4 : Toz çıkartma işlemine tabi tutulan numune örneği

Klorür içeriği analizi yapılmak üzere her numune için toz katmanları Çizelge 3.5’ de verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Klorür analizi yapılan katman derinlikleri

Katman No	Derinlik (mm)
1	0,5
2	2
3	4,5
4	7,5
5	10,5
6	13,5
7	16,5
8	19,5
9	23
10	27,5
11	32,5
12	37,5

Tozu çıkarılan her bir katman için en az 5' er gramlık tartımlar halinde hazırlanan numuneler, saf su ile 100 ml' ye tamamlanmış ve 3'er dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Şekil 3.5'de gösterilen Radiometer Analytical firmasına ait TitraLab 840 (mono burette) titrasyon cihazı ile elde edilen çözeltinin klorür içeriği tayini yapılmıştır. Yapılan tayinlerden elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmış ve sonuçlar grafiklere aktarılmıştır.



Şekil 3.5 : Eşik klorür konsantrasyonu tayininde kullanılan Titralab 840 cihazı

3.4.2.1 Titrimetrik analiz (potansiyometrik titrasyon)

Hacim ölçümüne dayanan tayin yöntemine verilen genel isimdir. Uygulama şekli, konsantrasyonu bilinmeyen maddenin belirli hacimdeki çözeltisine, tespit edilecek madde ile reaksiyona giren ve konsantrasyonu bilinen bir maddenin çözeltisi yavaş yavaş ilave edilir. Reaksiyonun tamamlanması esnasında ilave edilmiş olan miktar belirlenerek buradan bilinmeyen madde konsantrasyonuna geçilir. Bu işlem aynı zamanda titrasyon olarak adlandırılır. Titrasyonlar manuel olarak veya titrant ekipman yardımıyla yapılabilir.

Potansiyometrik titrasyon, iki elektrot (referans ve indikatör elektrot) arasındaki potansiyelin sarf edilen belirtecin hacminin bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü hacimsel bir yöntemdir. Potansiyometrik titrasyonların reaksiyon tipleri genel olarak; asit-baz etkileşimi, redoks, çöktürme ve kompleksometriktir. Potansiyometrik titrasyonlar,

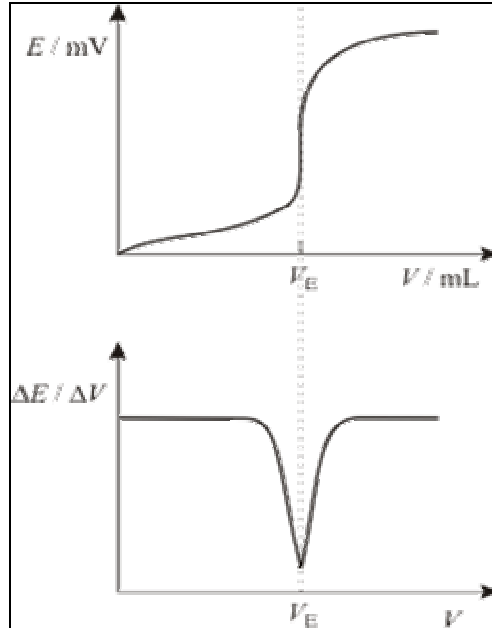
daha doğru ve hassas sonuçlar verdikleri için manuel titrasyonlara göre daha fazla tercih edilirler.

En yaygın olarak kullanılan referans elektrot Gümüş/Gümüş Klorür elektrodudur. Potansiyel, aşağıdaki denge reaksiyonuna göre yürümektedir:



Kimyasal eşdeğerliğe göre reaksiyona giren madde oranları sabit olduğundan, ölçülecek madde hacmi belli ise bu çözeltideki maddenin konsantrasyonu standart çözeltinin harcanan hacmi ölçülerek bulunabilir. Eşdeğer nokta veya stokiometrik nokta, titrasyonda numune ve standart çözeltinin eşdeğer miktarlara eriştiği nokta olarak tanımlanır. Titrasyonun sonu ise eşdeğer noktayı belirleyici bir madde (indikatör) veya bir düzen (iletkenlik vs.) yardımıyla görülebilir.

Titrasyon eğrisi (Şekil 3.6) logaritmiktir ve sigmoid eğrinin özelliklerine sahiptir. Eğrinin dönüm noktasında birinci türev $\Delta E / \Delta V$, eğrinin eğimidir ve en yüksek değerdedir. Bu dönüm noktası simetrik tepkimelerin eşdeğerlik noktasıdır ve bu nokta sarf edilen belirteç hacmine denk gelmektedir.



Şekil 3.6 : Titrasyon eğrisi

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

4.1 Durabilite Deneyleri

Silis dumanı içeren numunelerin durabilite deneyleri olarak yapılan korozyon hızı, korozyon potansiyeli, özdirenç ölçümleri ile ilgili sonuçların değerlendirilmesi aşamasında okumaların günlük ortalamaları alınarak çizelgeye işlenmiştir. Çizelge 4.1’ de en son ortalama ölçüm değerleri görülmektedir.

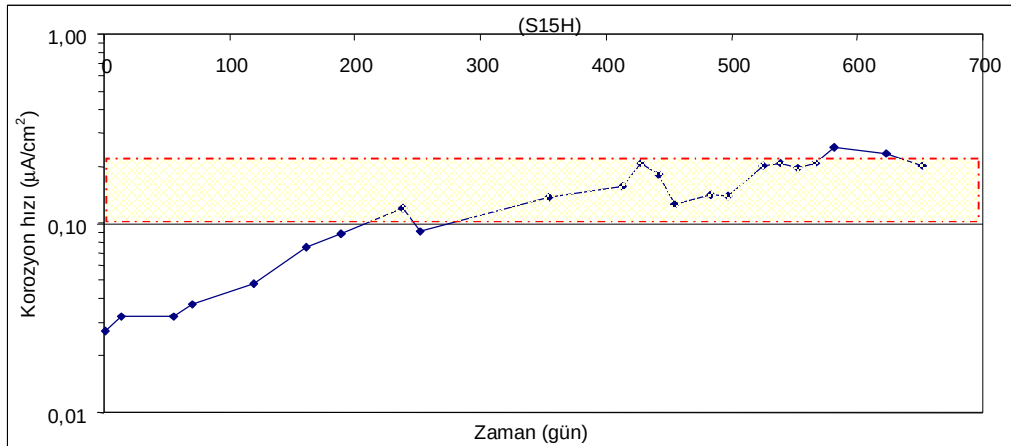
Çizelge 4.1 : Hava ve su kürü uygulanmış numunelerin korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve özdirenç değerlerinin ortalamaları

Numune	Korozyon Hızı (Hava) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Korozyon Potansiyeli (Hava) mV	Özdirenç (Hava) Ohm.m	Korozyon Hızı (Su) $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Korozyon Potansiyeli (Su) mV	Özdirenç (Su) Ohm.m
S1	0,04	-146,84	12,381	0,025	-81,242	11,516
S2	0,03	-206,09	19,69	0,023	-193,283	13,97
S3	0,053	-154,687	14,55	0,03	-130,033	6,93
S4	0,16	-291,22	5,576	0,125	-214,865	3,92
S5	0,035	-149,54	16,25	0,023	-112,143	10,43
S6	0,11	-126,575	18,18	0,037	-195,997	9,81
S7	0,222	-234,577	7,88	0,109	-227,369	4,762
S8	1,064	-450,05	11,019	0,224	-450,416	3,577
S9	0,063	-232,15	6,74	0,043	-157,38	5,893
S10	0,073	-356,05	11,13	0,037	-163,66	18,66
S11	0,106	-259,565	16,8	0,057	-180,797	11,72
S12	0,1975	-384,516	8,339	0,045	-169,33	5,333
S13	0,06	-137,65	18,795	0,033	-79,857	12,81
S14	0,055	-240,98	42,98	0,037	-214,253	19,16
S15	0,201	-274,786	7,933	0,03	-103,52	6,845
S16	0,124	-280,861	11,733	0,108	-228,787	9,628
S17	0,189	-276,038	14,607	0,122	-124,281	10,162
S18	0,18	-208,332	9,968	0,134	-123,625	12,63
S19	0,06	-137,05	14,68	0,03	-100,3	7,27
S20	0,175	-230,747	9,001	0,1	-211,56	10,963

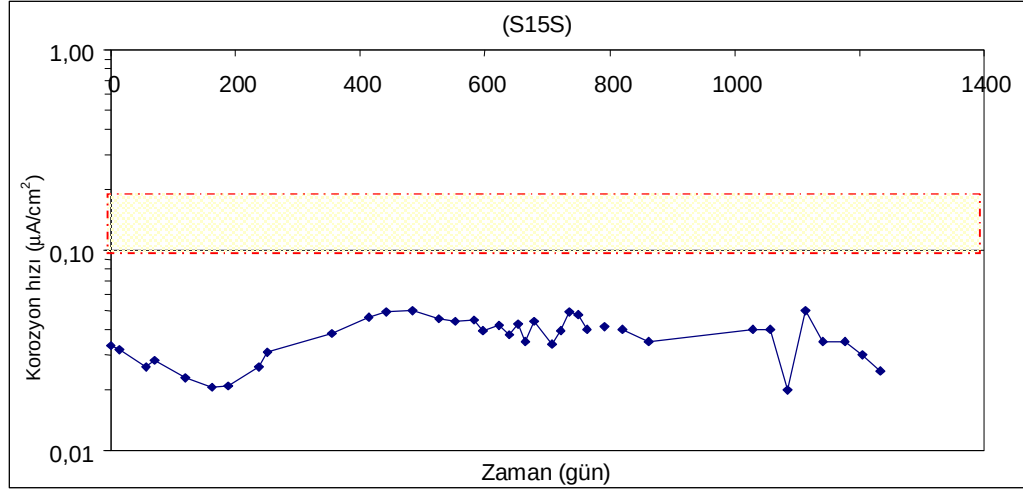
Tüm numuneler dönüşümlü olarak yedi gün bir molar NaCl çözeltisinde, yedi gün havada bekletilerek üç yıl boyunca çevrime tabi tutulmuştur. Ölçüm yapıldığı süre içerisinde her bir karışımın korozyonunun başlayıp başlamadığının belirlenmesi amacı ile üç numuneden oluşan her bir karışım (Örn. S15 Hava) türüne ait korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve öz direnç ölçümlerinin ortalamaları birlikte değerlendirilmiştir. Buna göre korozyon hızı ortalamaları ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ile ($0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) arasında, korozyon potansiyelleri (-200mV) ile (-350mV) arasında ve öz direnci $10 \text{ k}\Omega$ altına indiğinde o gruba ait numuneler çevrimden çıkarılmış ve tornada tozu çıkarılarak Çizelge 3.6’ da belirtilen katmanlar için klorür konsantrasyonunun bulunması amacı ile potansiyometrik titrasyon yöntemi uygulanmıştır.

4.1.1 Korozyon hızı ölçümlerinin değerlendirilmesi

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’ de S15 numunesine ait hava ve su kürlerine ait korozyon hızının zamanla değişimi gösterilmiştir. Korozyon hızı değerleri ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) ve zaman (gün) olarak verilmiştir. Korozyon hızı $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ nin üzerine çıktığında korozyonun başlama olasılığı olduğu anlaşılmaktadır [36]. S15 Hava numunesinin korozyon hızının 238. günden itibaren kritik eşiğin üzerine çıktığı ancak S15 Su numunesinde bu değerin aşılamadığı görülmektedir. Diğer numunelere ait grafikler Ek’ de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Havada tutulan S15 numunelerinin korozyon hızının zamanla değişimi

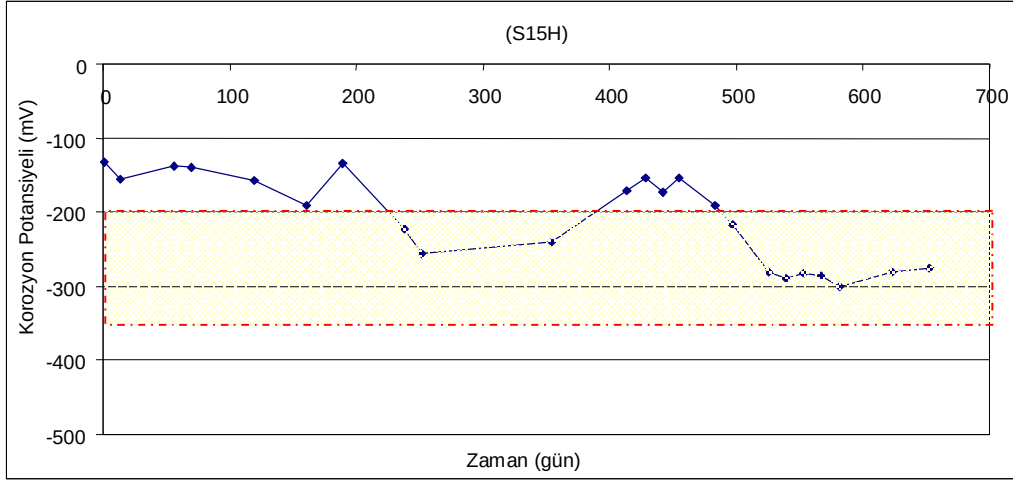


Şekil 4.2 : Suda tutulan S15 numunelerinin korozyon hızının zamanla değişimi

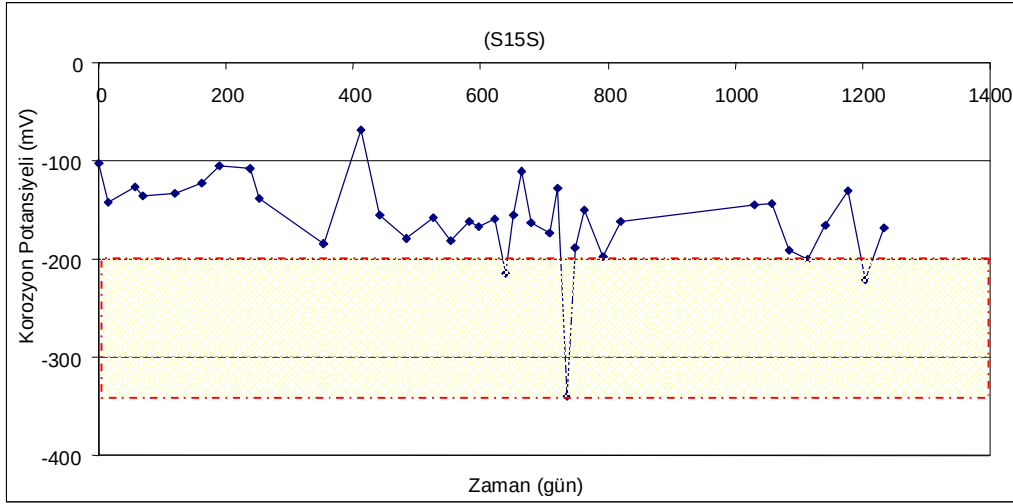
Korozyon hızı ölçümlerinden elde edilen grafiklerde verilen doksan gün açıkta saklanmış numuneler üzerinde yapılan lineer polarizasyon ölçümlerinde korozyon potansiyeli ölçümlerinde riskli gruba giren S7, S8, S11, S12, S15, S16, S17, S18 numunelerinde $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinin üzerine çıkmıştır. Su kürü uygulanmış numunelerin lineer polarizasyon ölçümlerinin grafikleri Ek A' da görülmektedir. Buna göre su kürü uygulanmış numunelerde korozyon başlangıcı olarak kabul edilen kritik ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ile $0,2 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ arası) bölgeye S8, S16, S17 ve S18 numuneleri ortalama olarak 100 gün sonra geçmiştir. Bu durum silis dumanı içeren ve yüksek su/bağlayıcı içeren betonlarda su kürünün önemini göstermektedir.

4.1.2 Korozyon potansiyeli ölçümlerinin değerlendirilmesi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' de S15 numunesine ait hava ve su kürlerine ait korozyon potansiyelinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Korozyon potansiyeli değerleri (mV) ve zaman (gün) olarak verilmiştir. Korozyon potansiyelinin (-200 mV) ile (-350 mV) arasında olduğu aralıkta korozyon olasılığının başladığı anlaşılmaktadır [33]. S15 Hava numunesinin korozyon potansiyelinin 238. günden itibaren kritik eşiğin altına inmeye başladığı ancak S15 Su numunesinde bu değerin aşılamadığı görülmektedir.



Şekil 4.3 : Havada tutulan S15 numunelerinin korozyon potansiyelinin zamanla değişimi

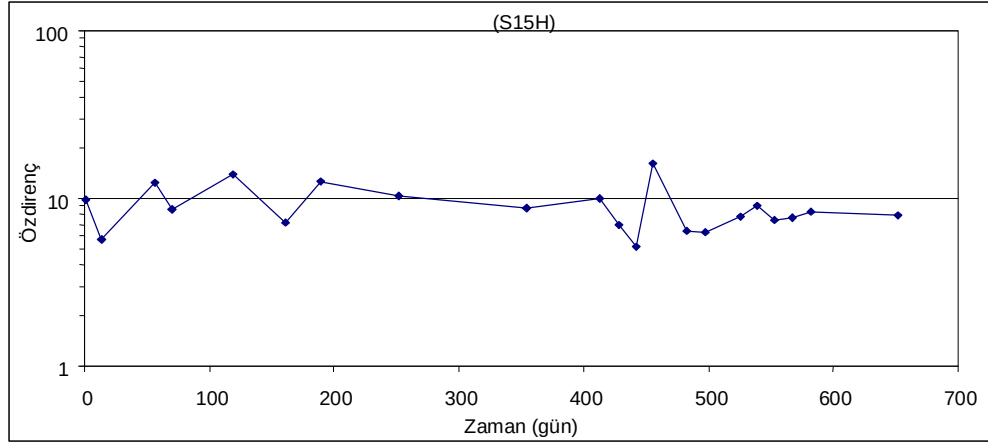


Şekil 4.4 : Suda tutulan S15 numunelerinin korozyon potansiyelinin zamanla değişimi

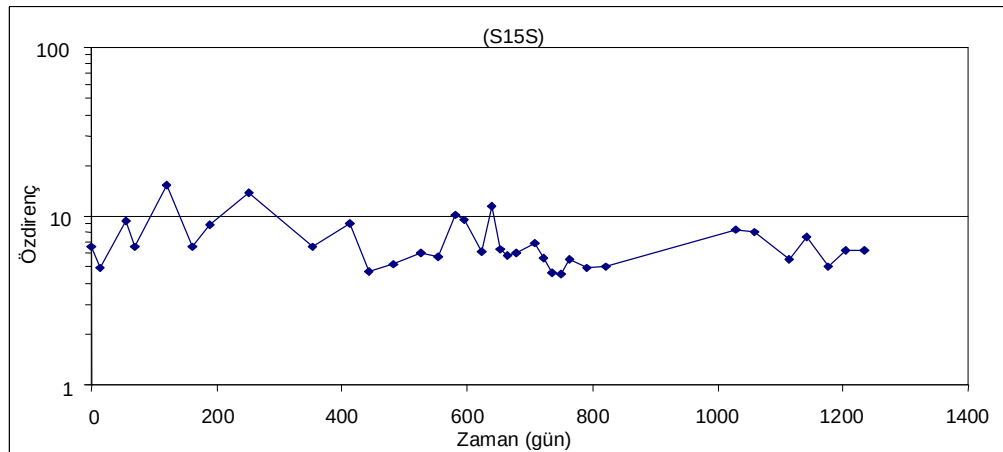
90 gün hava kürü uygulandıktan sonra 1 molar sodyum klorür içeren havuza yerleştirilen numunelerde yapılan korozyon potansiyeli ölçümlerinde S3, S4, S7, S8, S12 ve S15 numunelerin korozyon potansiyel değerleri Ek A'da verilen grafiklerde görüldüğü gibi sınır değer olan -350 mV değerinin altına düşmüştür. Hava kürüne tabi tutulmuş diğer numunelerin korozyon potansiyel değerleri ilk haftalarda alt sınır değer altına düşmesine rağmen ilerleyen zamanlarda tekrar yükselmiştir. Bu durum, havada beklemiş silis dumanı içeren numunelerin, klorür içeren çözeltiye konulmasının ardından meydana gelen puzolanik reaksiyonun olumlu etkisiyle açıklanabilir. Doksan gün su kürü uygulanmış ve korozyon potansiyeli grafikleri Ek A'da verilen numunelerde ölçüm süresi boyunca korozyon potansiyeli sınır değer olan -350 mV'un altına düşmemiştir.

4.1.3 Özdirenç ölçümlerinin değerlendirilmesi

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da S15 karışımının havada tutulmuş ve su kürü uygulanmış numunelerine ait özdirenç değerlerinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Özdirenç değerleri ($k\Omega$) ve zaman (gün) olarak verilmiştir. Özdirenç değeri $10 k\Omega$ altına düştüğünde korozyon hızının özdirenç ile kontrol edilemediği kabul edilir [35]. S15 Hava numunesinin korozyon hızı ve korozyon potansiyeli korozyon riski koşullarını sağlamıştır ve özdirenç incelendiğinde de 354. günden itibaren $10 k\Omega$ altına indiği gözlemlenmiştir. D S15 Su numunesinde korozyon hızı ve korozyon potansiyeli değerleri korozyon riski koşullarını sağlamadığı için numunede korozyonun başlamadığı kabul edilmiştir.



Şekil 4.5 : Havada tutulan S15 numunelerinin özdirenç değerlerinin zamanla değişimi

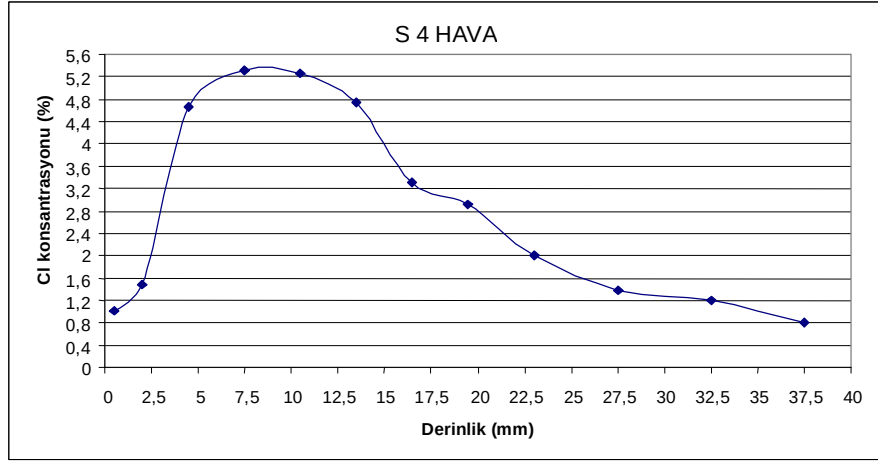


Şekil 4.6 : Suda tutulan S15 numunelerinin özdirenç değerlerinin zamanla değişimi

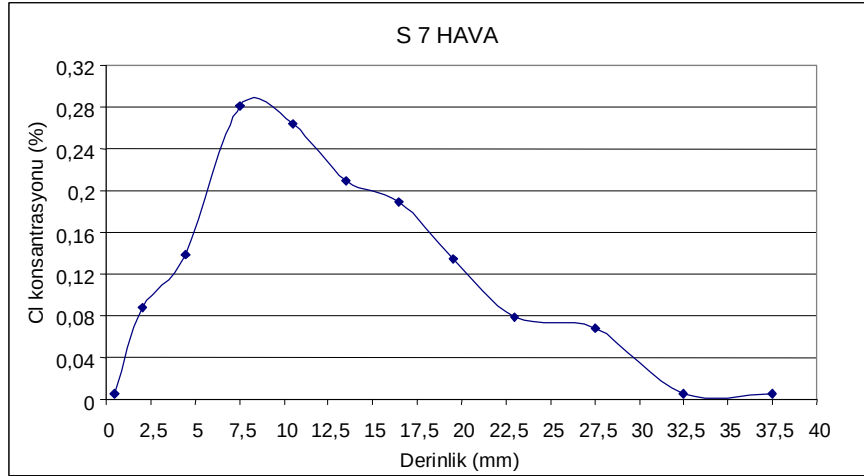
Ek A'da verilen grafiklerde S3, S4, S7, S8, S12 ve S15 numunelerinin, 1 molar klorür içeren havuza yerleştirilmeleriyle birlikte azalan öz direnç değerlerinin, zamanla korozyona karşı direnç için alt sınır olarak kabul edilen 10 k Ω değerinin altına düştüğü görülmektedir. Bu numunelerden S4 silis dumanı içermezken, S8, S12 ve S15 numuneleri % 3 oranında (tasarımdaki alt sınır silis dumanı / bağlayıcı) silis dumanı içermektedir. S7 numunesi Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre girilen üst su/bağlayıcı değerinin üzerinde, S3 ise üst bağlayıcı sınırının da üzerinde bileşime sahiptir. Diğer beton numunelerinde öz direncin sınır değerinin altında değer tespit edilmemiştir. Ek A'da öz direnç-zaman grafikleri verilen doksan gün su kürü uygulanmış numunelerin öz direnç değerleri incelendiğinde havada tutulan numunelerin öz direncinin, suda tutulan numunelere göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Suda tutulan numunelerin öz direncinin daha yüksek çıkması beklendiğinden, tam olarak kurumayan numunelerde serbest iyon akımının daha kolay olması nedeni ile öz direnç ölçümlerinin olumsuz yönde etkilendiği ve yedi günlük kuruma süresinin suda tutulan numuneler için yetersiz olabileceği düşünülmektedir.

4.2 Klorür Konsantrasyonları Analiz Sonuçları

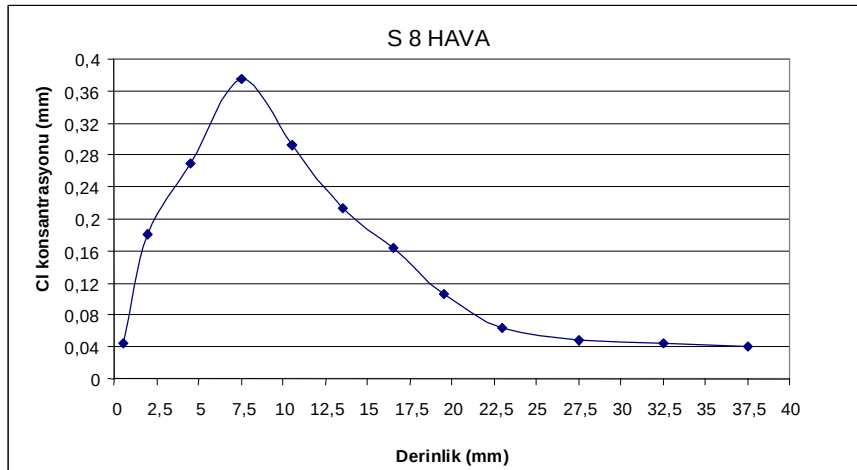
Düzenli olarak çevrime tabi tutulan numuneler içerisinde korozyon başlama riski olan S4, S7, S8, S11, S12, S15, S16, S17 ve S18 hava numuneleri çevrimden çıkarılmıştır. Eşik klorür konsantrasyonunun bulunabilmesi amacı ile farklı katmanlardaki toz çıkarma işlemi yapılmış potansiyometrik titrasyon yöntemi uygulanarak klorür konsantrasyonu analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre en yüksek klorür konsantrasyonuna sahip numunenin silis dumanı içermeyen S4 havada tutulan numune olduğu görülmektedir.



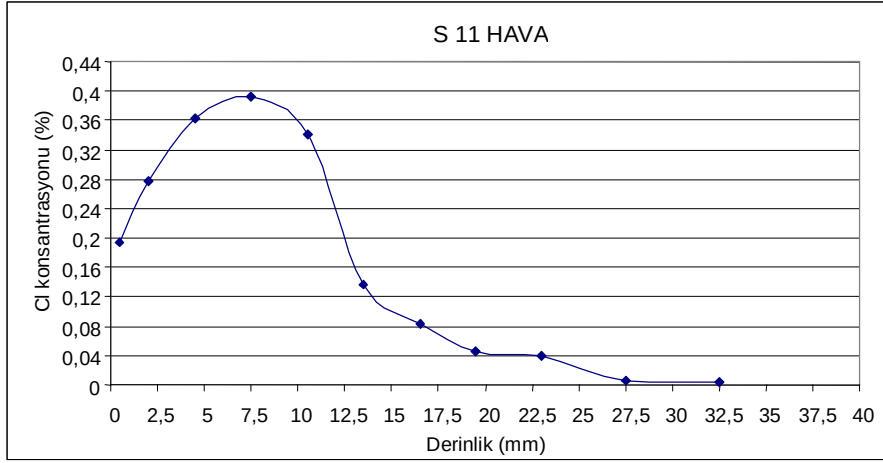
Şekil 4.7 : Havada tutulan S4 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi



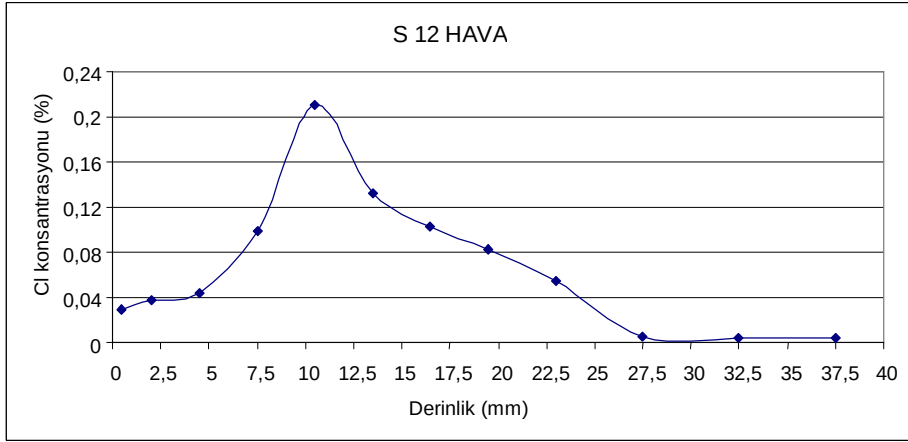
Şekil 4.8 : Havada tutulan S7 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi



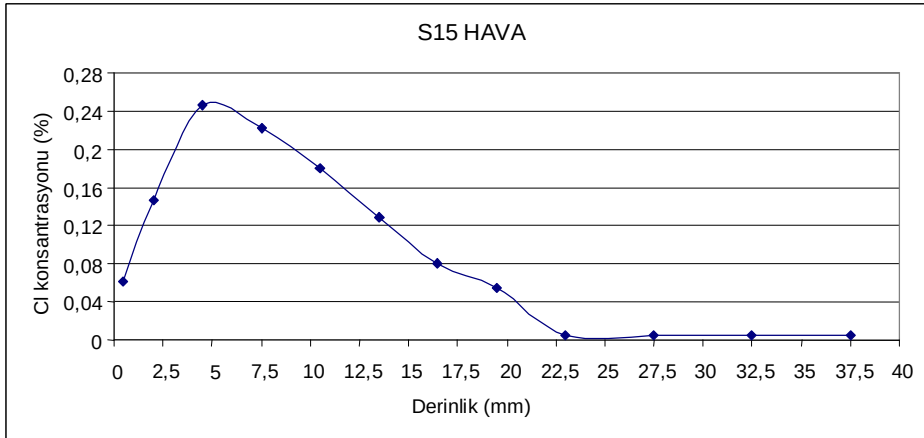
Şekil 4.9 : Havada tutulan S8 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi



Şekil 4.10 : Havada tutulan S11 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi

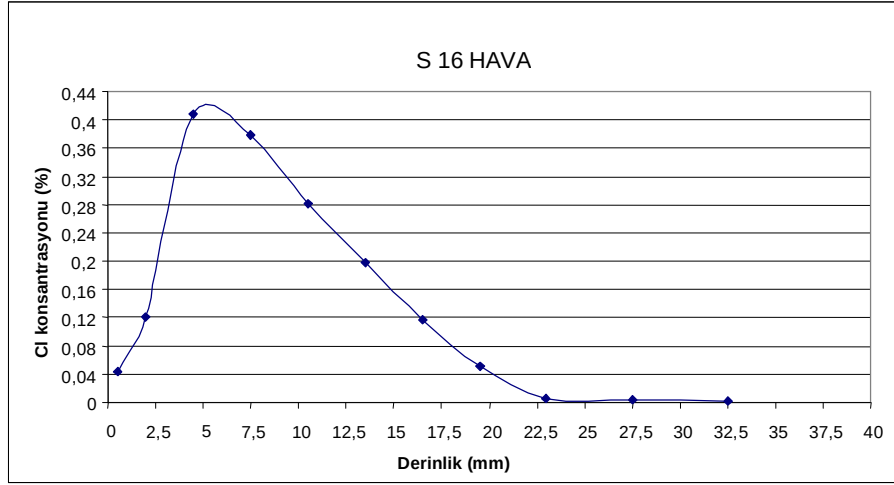


Şekil 4.11 : Havada tutulan S12 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi

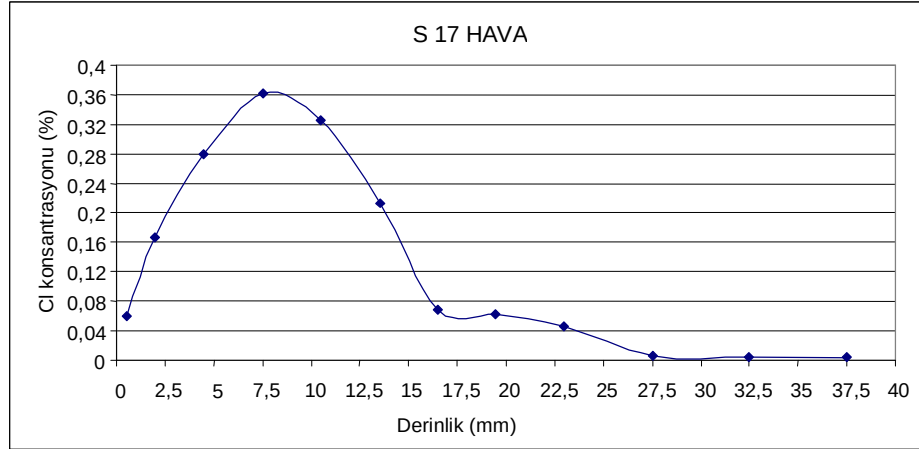


Şekil 4.12 : Havada tutulan S15 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi

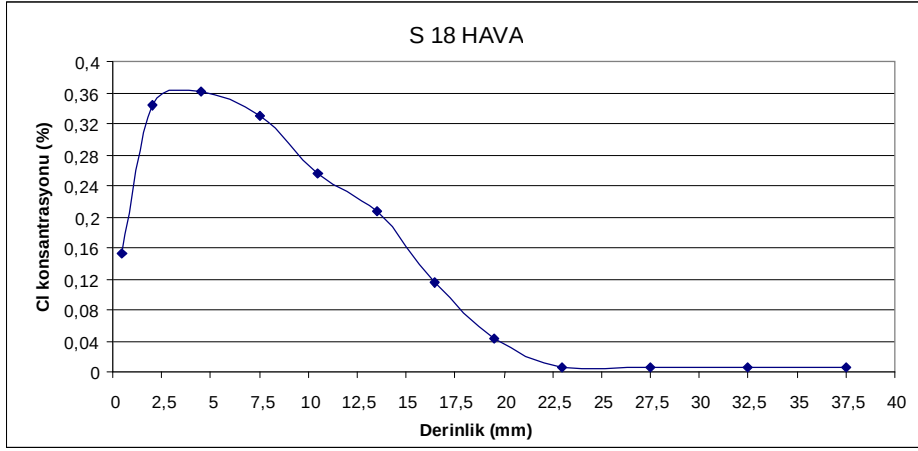
Klorür konsantrasyonları analiz sonuçlarına göre yapılan çalışma süresince klorür etkisinden en çok zarar gören numune grubunun silis dumanı içermeyen S4 Hava olduğu söylenebilir. Diğerleri ile karşılaştırıldığında en yüksek klorür konsantrasyonu değerinde on kata kadar varan bir farklılık olduğu anlaşılmıştır. Bu da silis dumanının klorür etkisine karşı dayanımı olumlu yönde etkilediği şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.13 : Havada tutulan S16 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi



Şekil 4.14 : Havada tutulan S17 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi



Şekil 4.15 : Havada tutulan S18 numunelerinin klorür konsantrasyonu-derinlik ilişkisi

Sonuçlara göre S4, S7, S8, S11, S17 numuneleri en yüksek klorür konsantrasyonuna dıştan içe doğru 5 ile 10 mm derinlikte ulaşırken S18, S15 ve S16 da 2,5 ile 5 mm arasında iken ulaşmıştır. S12 de bu değer 10 ile 15 mm derinliktedir. Çizelge 4.3’ de en yüksek klorür konsantrasyonunun ulaşıldığı derinlik değerleri (KKD) ve aynı numuneler için daha önce yapılan bir çalışmadaki [36] hızlı klorür geçirimliliği (HKG) değerleri gösterilmiştir.

ASTM C1202 [38]’ de belirtilen hızlı klor geçirimliliği deneyi sonuçlarında elde edilen coulomb değeri 100 ile 1000 arası olduğunda çok düşük klor geçirimliliği, bu değer 100’ün altına indiğinde klor geçirimliliği ihmal edilebilir olarak belirtilmiştir. Çizelge 4.2’de, beton karışımındaki silis dumanı oranının klorür geçirimliliğine etkisi verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Geçen akım (coulomb)-klorür geçirimliliği değerleri [38]

Geçen Akım (coulomb)	Klorür Geçirimliliği
>4,000	Yüksek
2,000-4,000	Orta
1,000-2,000	Düşük
100-1,000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Çizelge 4.3 : Klorür konsantrasyonu-derinlik değerleri

Numune No	B	SD/B	Su/B	HKG (Coulomb)	Korozyon Başlangıcı (gün)	KKD (mm)	Klorür Kons. (%)
S4 H	350	0,00	0,53	6324	1122	5-10	5,302
S7 H	350	0,075	0,614	3483	240	5-10	0,281
S8 H	400	0,03	0,58	8109	618	5-10	0,3755
S11 H	266	0,075	0,53	511	821	5-10	0,3924
S12 H	300	0,03	0,58	3812	189	10-15	0,2107
S15 H	400	0,03	0,48	3399	652	2.5-5	0,2466
S16 H	350	0,075	0,53	812	652	2.5-5	0,4083
S17 H	350	0,075	0,53	810	652	5-10	0,3611
S18 H	350	0,075	0,53	814	763	2.5-5	0,3618

Buna göre ASTM C 1202' ye göre verilen Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3' deki değerler ile yapılan karşılaştırmada; HKG testi sonuçlarına göre yüksek klorür geçirimli olarak tesbit edilen numunelerde klorür konsantrasyonunun beton içerisinde bağlayıcı, silis dumanı / bağlayıcı ve su / bağlayıcı farklılıklarına göre numunenin dış yüzeyinden donatı yönüne doğru en az 32,5 mm ve daha fazla ilerlediği görülmektedir. Orta derecede klorür geçirimliliğe sahip numunelerde derinlik, yine farklı bağlayıcı, silis dumanı / bağlayıcı ve su / bağlayıcı oranlarına göre 23 mm ile 32,5 mm arasında kalmıştır. Çok düşük geçirimli olarak adlandırılan numunelerde derinliğin çoğunlukla 23 mm' de kaldığı ancak iki numunede 27,5 mm' ye ulaştığı tesbit edilmiştir. Aynı bileşime sahip S16H-S17H-S18H kodlu 3 numunede HKG değerleri birbirine çok yakınken, klorür derinliği ve KKD değeri iki numunede daha yakın, 3. numunede biraz daha farklı çıkmıştır. Serbest iyonların ölçülme prensibine dayanan hızlı klorür geçirimliliği testinde, yüksek orandaki silis dumanı içeriğinin serbest iyonları bağlayarak hızlı klorür geçirimliliği testi sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir.

4.3 İstatistiksel Değerlendirmeler

Tez çalışmasında üretilen beton numuneleriyle yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarla yapılan istatistiksel çalışmalar için hazır bir bilgisayar programı

kullanılmıştır. Hava ve su kürleri için ayrı ayrı korozyon hızı, korozyon potansiyeli, öz direnç değerleri modellenerek değişkenlerin anlamlılığı, her model üzerine etkisi ve birbirleri arasındaki ilişkileri varyans analizi (ANOVA) ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir. Tablolarda verilen katsayı sütunu, fonksiyonda kullanılan değişkenlerin katsayıları, F-değeri sütunu, gerçek değerlerin karelerin ortalamalarının hata oranının karelerinin ortalamasına bölümüyle bulunan değerlerdir. F-değerinin artması doğruluğa yaklaşıldığını göstermektedir. Buna bağlı olarak anlamlılık derecesi de F-değerine bağlı olarak bulunan olasılık değerleridir. Bir değişkenin anlamlılık derecesi 0,1'den büyük olması, o fonksiyonda çok fazla bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Anlamlılık derecesi (Prob>F), 0,05' den küçük olan değişkenler ise fonksiyonun sonucunda daha etkin olan değişkenlerdir.

4.3.1 Korozyon hızı

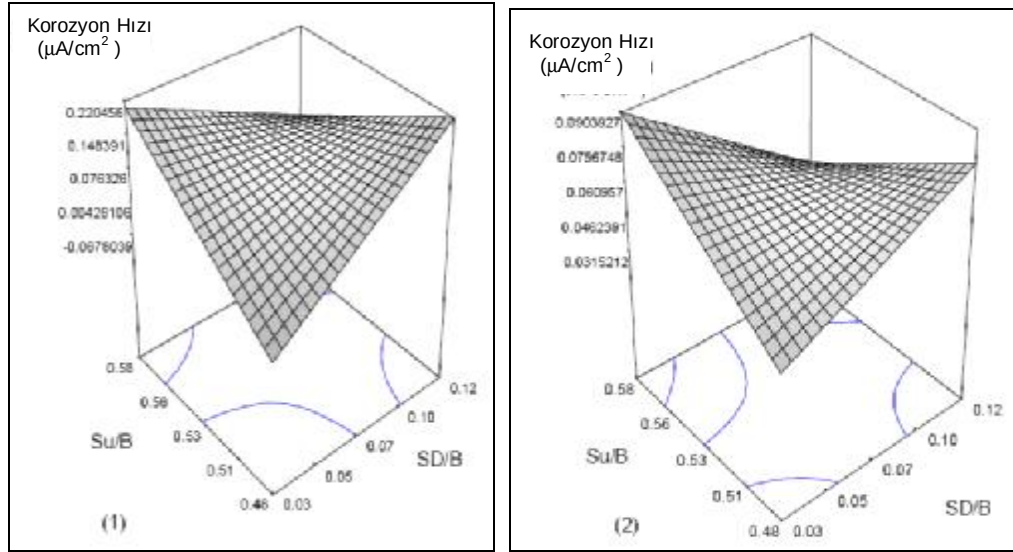
Elde edilen korozyon hızları su ve hava kürleri için analiz edilmiş ve üç boyutlu grafiklerde farklı oranlarda bağlayıcı, silis dumanı ve su içeren numunelerin korozyon hızlarında meydana gelen değişiklikler izlenmiştir. Oluşturulan fonksiyon denklem (4.1)' de, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Çizelge 4.13' de verilmiştir.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1.(B) + \alpha_2.(SD / B) + \alpha_3.(Su / B) + \alpha_4.(B).(SD / B) + \alpha_5.(B).(Su / B) + \alpha_6.(SD / B).(Su / B) \quad (4.1)$$

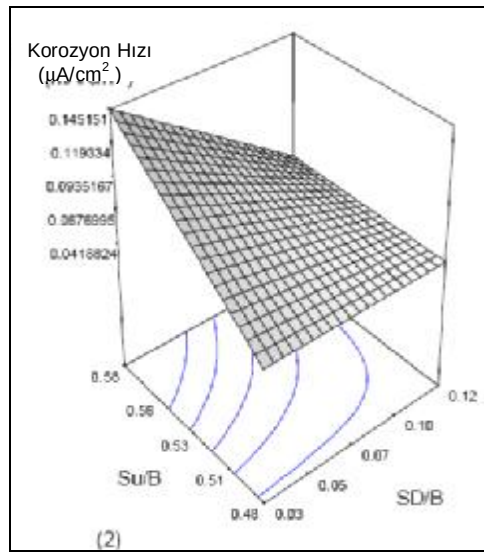
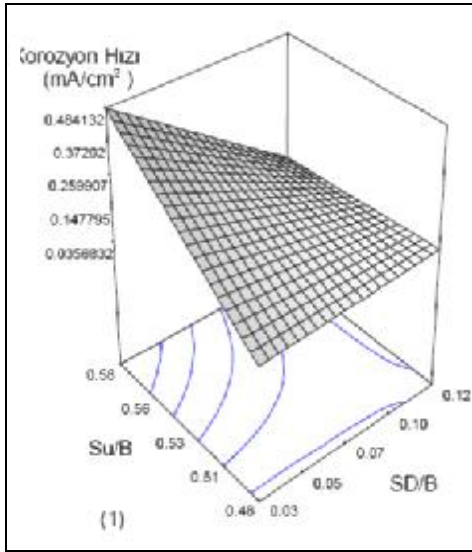
Çizelge 4.4'deki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hem hava kürleri hem de su kürleri için oluşturulan modellerin anlamlı oldukları görülmektedir. Buna göre; hava kürleri numuneleri için oluşturulan fonksiyonda bağlayıcı, su / bağlayıcı, (bağlayıcı)*(silis dumanı / bağlayıcı) ve (silis duman / bağlayıcı)* (su / bağlayıcı) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kuru numuneleri için oluşturulan denklemde ise silis dumanı / bağlayıcı ve su / bağlayıcı değişkenlerinin fonksiyon sonucu üzerinde etkili oldukları anlaşılmaktadır. Anlamlı olan faktörlerin katsayıları incelendiğinde silis dumanı / bağlayıcı oranının hem hava hem de su kürleri için negatif değerde olması, korozyon hızını azaltıcı yönde etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde su/çimento oranı azaldıkça korozyon hızı azalmaktadır.

Çizelge 4.4 : Korozyon hızları için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri

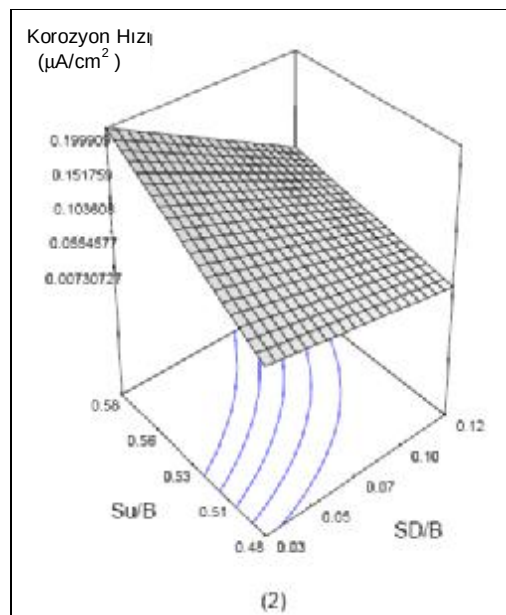
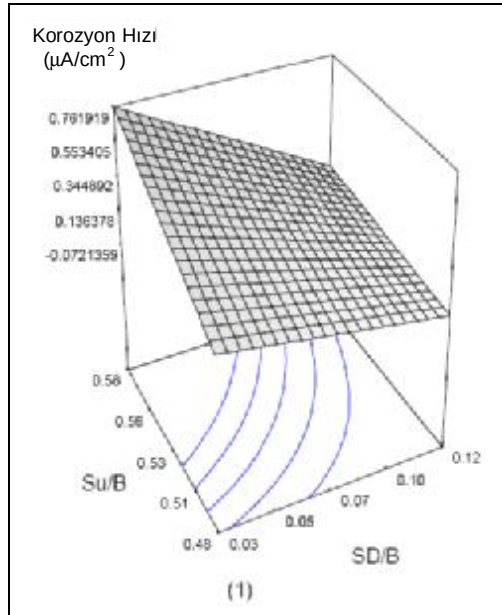
Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü $r^2=0,6910$	Su Kürü $r^2=0,5955$	Hava Kürü $r^2=0,6910$	Su Kürü $r^2=0,5955$
	a_0	0,16	0,069				
B	a_1	0,066	0,01	2,65	0,82	0,1278	0,3824
S. D. /B.	a_2	-0,10	-0,026	6,72	5,26	0,0223	0,0391
Su / B.	a_3	0,10	0,026	6,14	5,44	0,0277	0,0364
B. (S.D/ B.)	a_4	-0,13	-0,021	6,01	2,09	0,0291	0,1720
B. (Su / B.)	a_5	0,083	0,024	2,44	2,61	0,1420	0,1299
(S.D/ B) (Su /B.)	a_6	-0,12	-0,025	5,11	2,92	0,0415	0,1113
Oluşturulan Model				4,85	3,19	0,0083	0,0376



Şekil 4.16 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 300 dozlu numunelerin korozyon hızı analizi



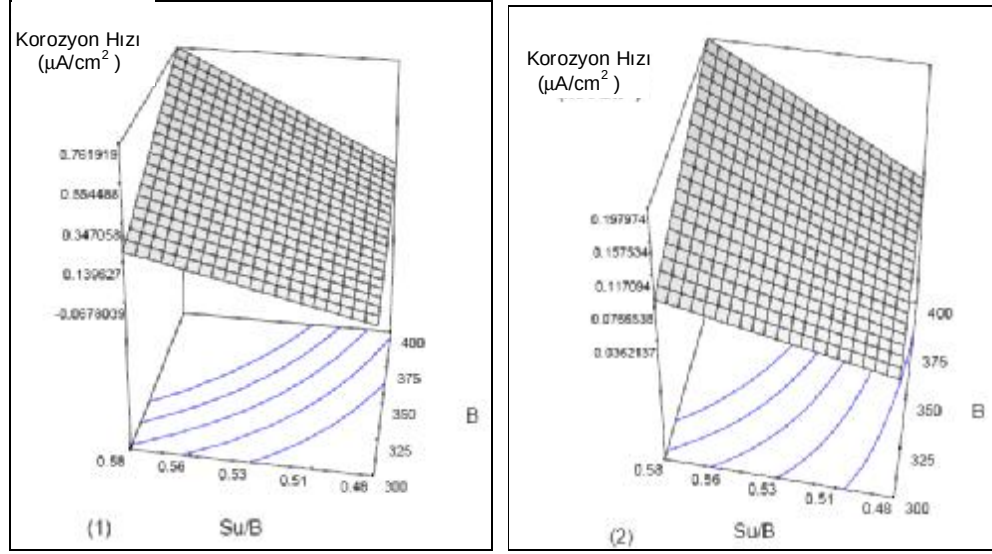
Şekil 4.17 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 350 dozlu numunelerin korozyon hızı analizi



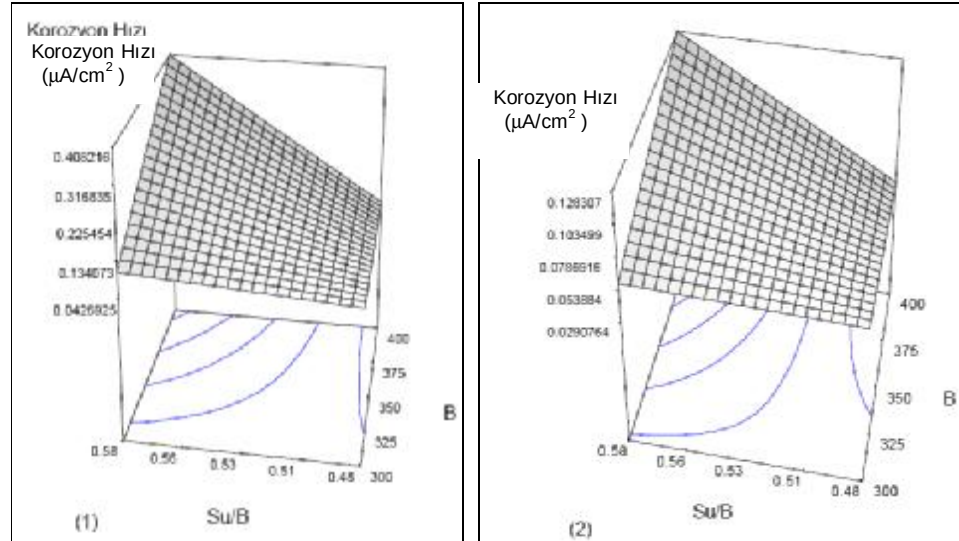
Şekil 4.18 : Hava kürü (1) ve su kürü (2) uygulanmış 400 dozlu numunelerin korozyon hızı analizi

Şekiller 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de görüldüğü gibi 300, 350 ve 400 dozlu betonların hem hava hem de su kürüne tutulmuş tüm numunelerinde genellikle su / bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte korozyon hızının arttığı gözlemlenmiştir. Su kürünün olumlu etkisi, korozyon hızı değerlerindeki farktan görülmektedir. Ancak 300 dozda silis dumanı / bağlayıcı oranı 0,12 olduğunda su / bağlayıcı oranının artışı

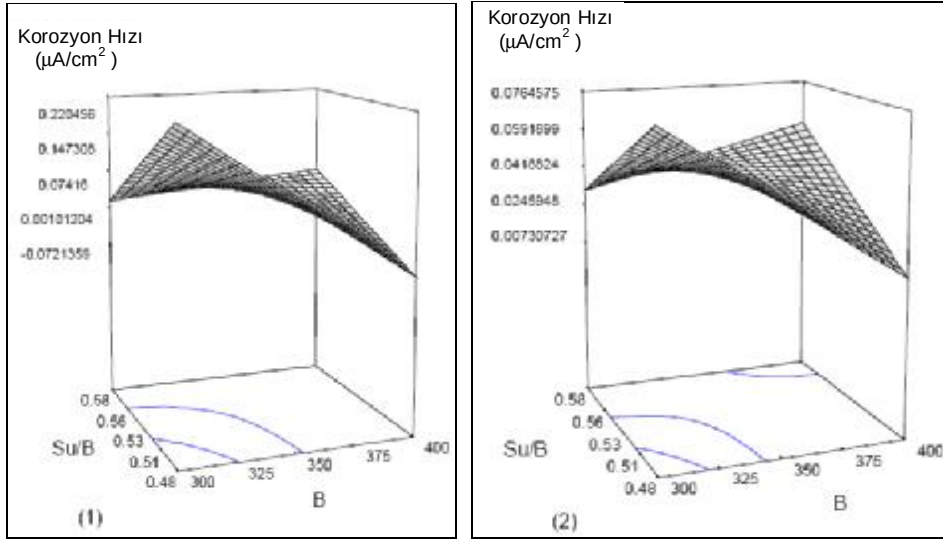
korozyon hızını düşürmüştür. 350 ve 400 dozlu betonlarda su / bağlayıcı oranının azalması ve silis dumanının artmasıyla birlikte, korozyon hızında düşme görülmüştür. 300 dozda su / bağlayıcı ve silis dumanı / bağlayıcı oranlarındaki değişimler benzer etkinlikte iken, 350 ve 400 dozda su / bağlayıcı oranındaki değişimin silis dumanı / bağlayıcı oranına göre daha etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,03 olan numunelerin korozyon hızı analizi

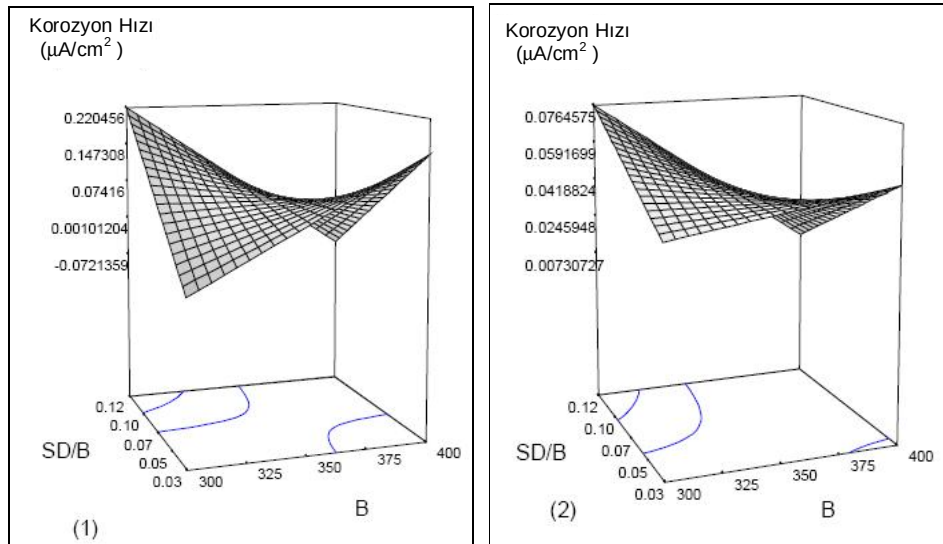


Şekil 4.20 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,07 olan numunelerin korozyon hızı analizi

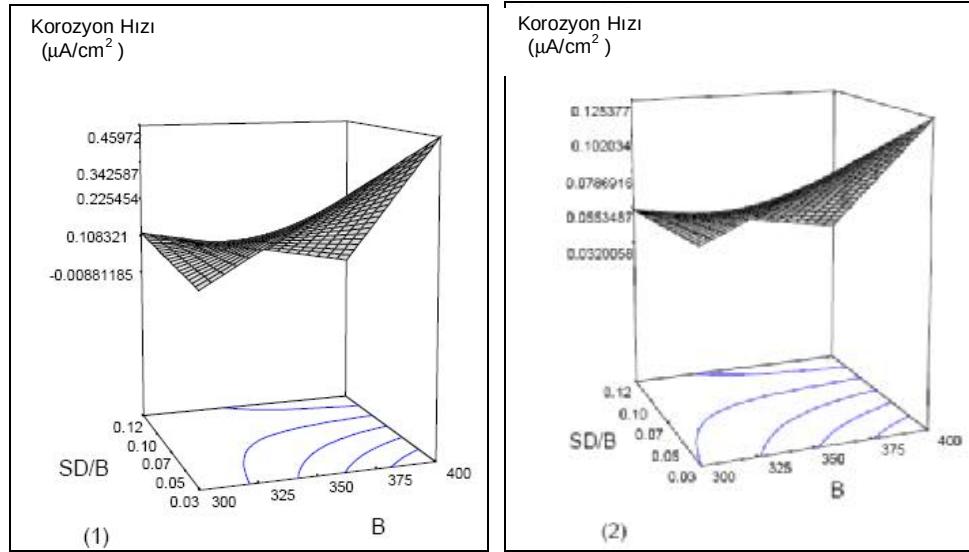


Şekil 4.21 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,12 olan numunelerin korozyon hızı analizi

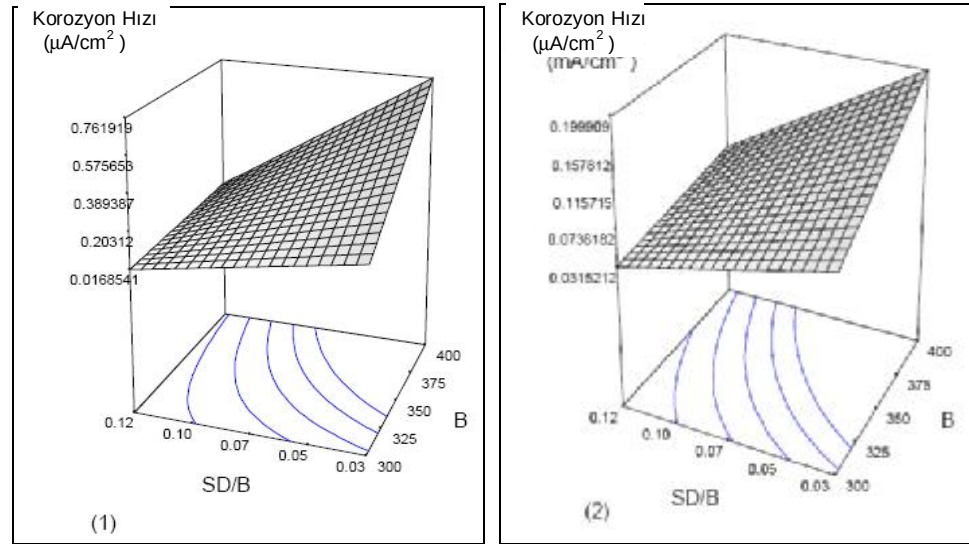
Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’ de görüldüğü gibi 0,03 ve 0,07 silis dumanı / bağlayıcı oranına sahip betonların hepsinde su / bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte korozyon hızının arttığı gözlemlenmiştir. 0,12 silis dumanı / bağlayıcı oranına sahip numunelerde ise düşük bağlayıcı dozajında su / bağlayıcı oranının artmasıyla korozyon hızında düşme olduğu ancak yüksek dozajlarda diğerlerinde görüldüğü gibi korozyon hızı su / çimento oranı arttıkça yükselmiştir. Diğer yandan Şekil 4.21’ deki değerler Şekiller 4.19 ve 4.20’ dekiler ile karşılaştırıldığında değerler çok düşük olduğu için bu düşüş dikkate alınmayabilir.



Şekil 4.22 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin korozyon hızı analizi



Şekil 4.23 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin korozyon hızı analizi



Şekil 4.24 : Hava kürü (1) ve su kürü (2) uygulanmış su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin korozyon hızı analizi

Şekil 4.22 de silis dumanı / bağlayıcı oranı 0,12 olduğunda korozyon hızı artmıştır. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de görüldüğü gibi 0,53 ve 0,58 su / bağlayıcı oranına sahip betonların hepsinde bağlayıcı miktarının artmasıyla birlikte korozyon hızının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu da çimento pastasındaki boşluk ile ilişkilendirilebilir. Farklı su / bağlayıcı oranlarına sahip tüm numunelerde hava ve su kürleri arasında korozyon hızı değerlerinde bir kaç kata kadar farklılıklar olduğu için bu durum su kürünün olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

4.3.2 Korozyon potansiyeli

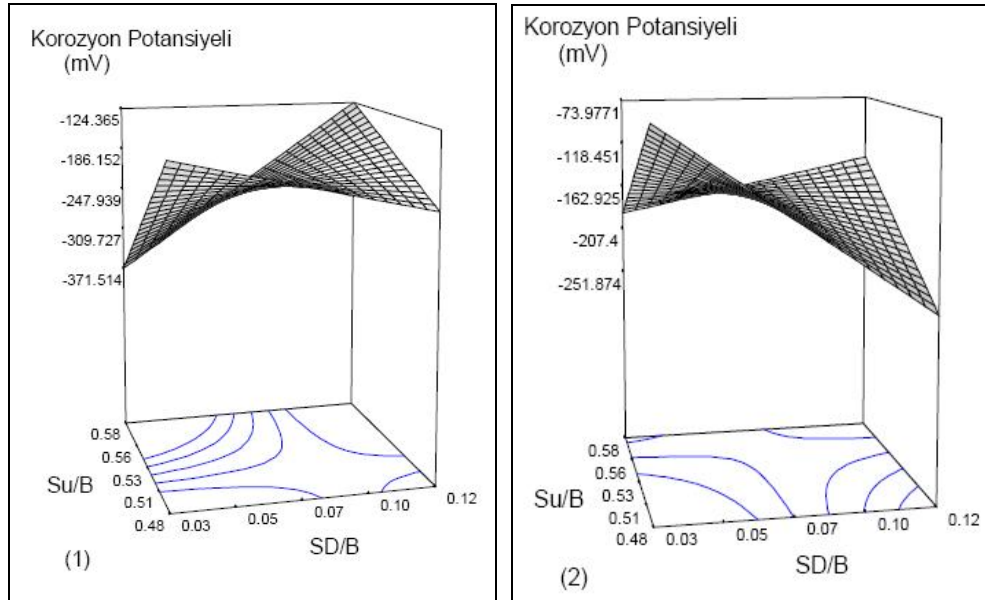
Elde edilen korozyon potansiyelleri su ve hava kürleri için analiz edilmiş ve üç boyutlu grafiklerde farklı oranlarda bağlayıcı, silis dumanı ve su içeren numunelerin korozyon potansiyellerinde meydana gelen değişiklikler izlenmiştir. Oluşturulan fonksiyon denklem (4.2)' de, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Çizelge 4.5' de verilmiştir.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1.(B) + \alpha_2.(SD / B) + \alpha_3.(Su / B) + \alpha_4.(B).(SD / B) + \alpha_5.(B).(Su / B) + \alpha_6.(SD / B).(Su / B) \quad (4.2)$$

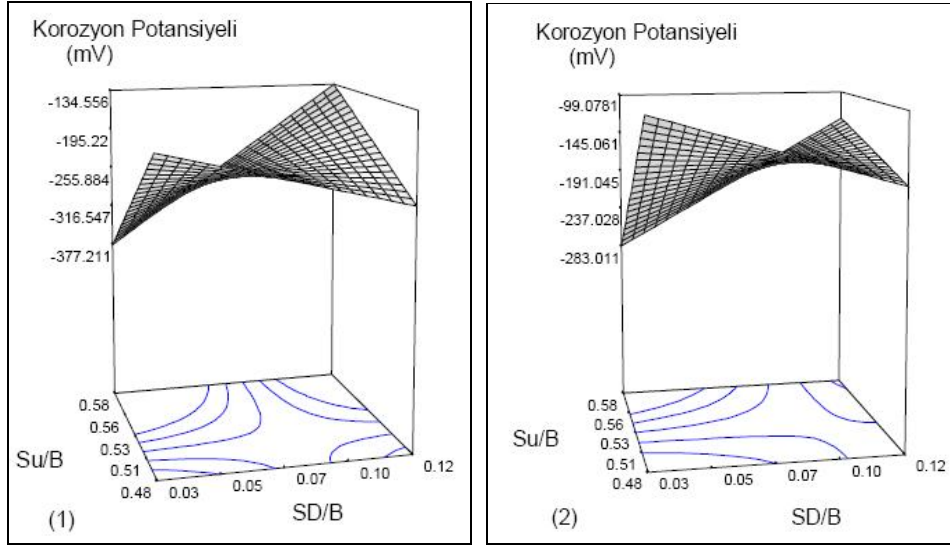
Çizelge 4.5' de verilen denklemlerin katsayılarına göre; bağlayıcı dozajı arttıkça potansiyel düşmekte; silis dumanı oranı arttığında ise artmaktadır, su / bağlayıcı oranı artışı ise azaltmaktadır. Burada potansiyelin azalması, korozyon riskini artırmaktadır. Ancak su / bağlayıcı oranının silis dumanı / bağlayıcı oranı ile etkileşim içinde olduğu da görülmektedir. Çizelge 4.5' deki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hem hava kürleri hem de su kürleri için oluşturulan modellerin anlamlı oldukları görülmektedir. Buna göre; hava kürleri numuneleri için oluşturulan fonksiyonda, silis dumanı / bağlayıcı ve (silis duman / bağlayıcı)* (su / bağlayıcı) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kürü numuneleri için oluşturulan denklemde ise bağlayıcı* (silis dumanı / bağlayıcı) ve (silis dumanı / bağlayıcı)* (su / bağlayıcı) değişkenlerinin fonksiyon sonucu üzerinde etkili oldukları anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.5 : Korozyon potansiyelleri için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri

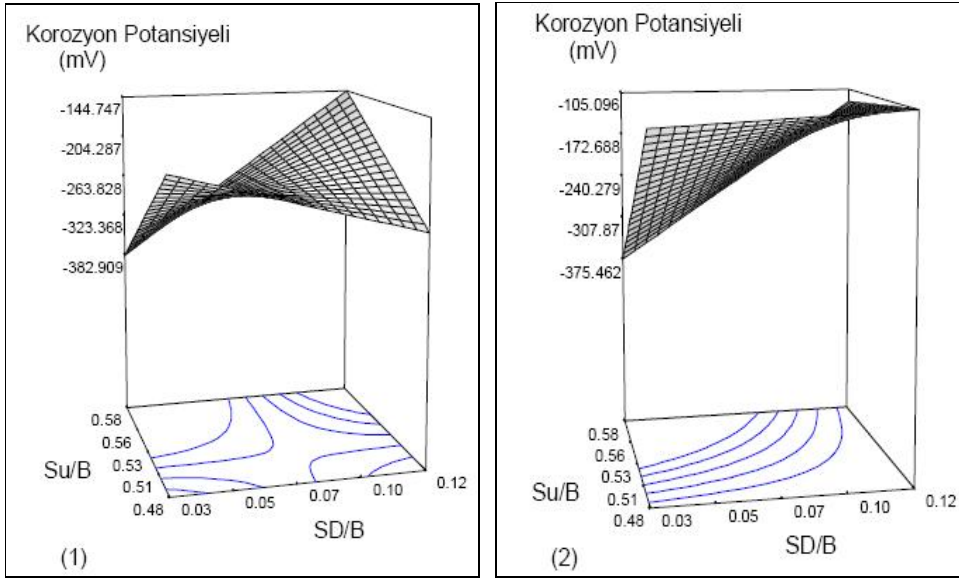
Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü $r^2=0,5773$	Su Kürü $r^2=0,6050$	Hava Kürü $r^2=0,5773$	Su Kürü $r^2=0,6050$
	a_0	-238,92	-173,13				
B	a_1	-18,08	-9,53	0,94	0,32	0,3499	0,5802
S. D. /B.	a_2	38,77	17,91	4,32	1,14	0,0579	0,3058
Su / B.	a_3	-16,97	-34,35	0,83	4,18	0,3794	0,0617
B. (S.D/ B.)	a_4	-2,25	49,24	0,00085	5,03	0,9279	0,0429
B. (Su / B.)	a_5	10,14	-33,67	0,17	2,35	0,6841	0,1490
(S.D/ B) (Su /B.)	a_6	82,55	57,61	11,48	6,89	0,048	0,0210
Oluşturulan Model				2,96	3,32	0,0477	0,0331



Şekil 4.25 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 300 dozlu numunelerin korozyon potansiyeli analizi



Şekil 4.26 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 350 dozlu numunelerin korozyon potansiyeli analizi



Şekil 4.27 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 400 dozlu numunelerin korozyon potansiyeli analizi

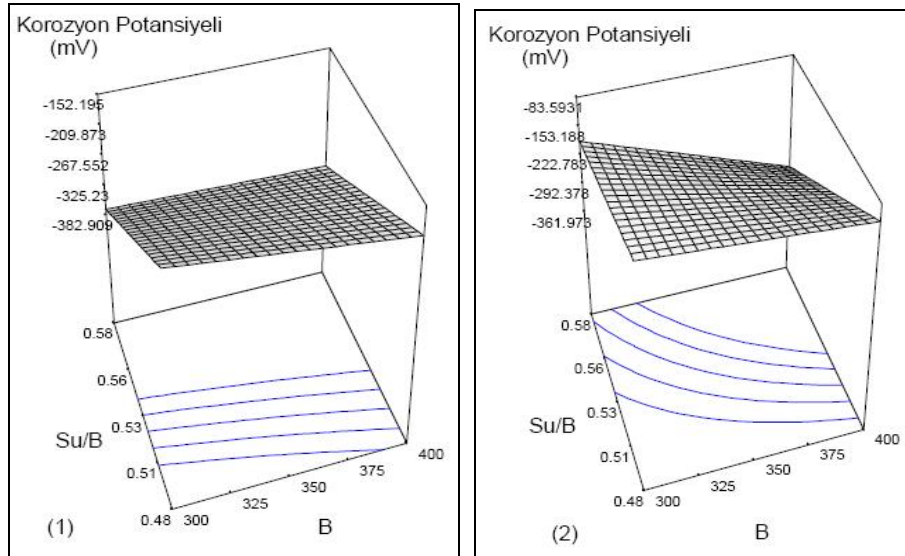
Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ de görüldüğü gibi 300, 350 ve 400 dozlu hava kürüne tabi tutulmuş numunelerde su / bağlayıcı oranı ile silis dumanı / bağlayıcı oranının etkileşimi görülmektedir. Düşük silis dumanı / bağlayıcı oranlarında su / bağlayıcı oranının düşmesi beklendiği gibi potansiyelin artmasına (dolayısı ile korozyon riskinin azalmasına) neden olurken, yüksek silis dumanı / bağlayıcı değerlerinde bir ölçüde potansiyelin azalmasına yol açmaktadır. Ancak genel olarak yüksek silis dumanı / bağlayıcı oranında potansiyel, düşük silis dumanı / bağlayıcı oranına göre daha yüksek düzeylerde. Bu betonlarda silis dumanı katılmasının

olumlu etkisi özellikle yüksek su / bağlayıcı oranlı betonlarda daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır.

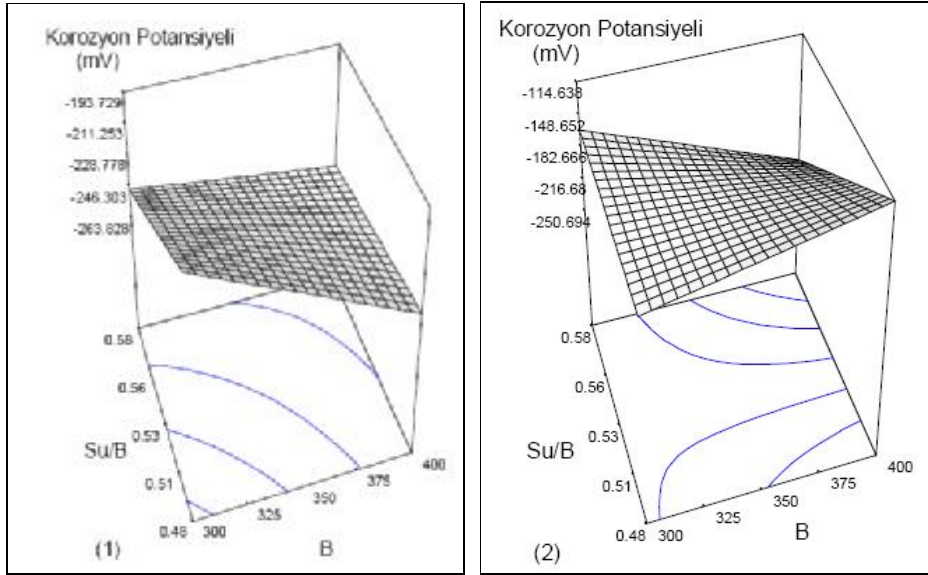
Öte yandan Şekiller 4.25, 4.26 ve 4.27’ de havada tutulmuş ve su kürü uygulanmış (1. ve 2.) genel potansiyel düzeyleri karşılaştırıldığında su kürünün olumlu etkisi görülmektedir.

Su kürü uygulanmış betonlarda su/ bağlayıcı oranının etkisi, havada tutulmuş numunelere benzemekle birlikte, yüksek silis dumanı / bağlayıcı oranına sahip karışımlarda görülen su / bağlayıcı oranı ile potansiyelin artması daha sınırlı düzeyde kalmıştır.

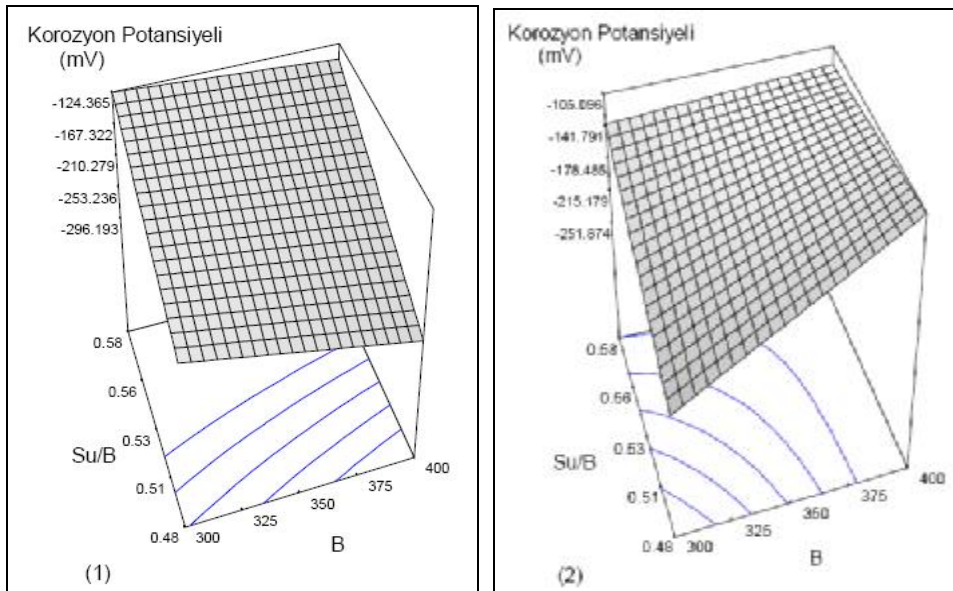
Hava kürü uygulanmış numunelerde silis dumanı / bağlayıcı oranının en yüksek olduğu durumda korozyon potansiyeli de en düşük değerine ulaşmaktadır. Ancak su kürlerinde 300 ve 350 dozlu numunelerde su / bağlayıcı oranının en düşük olduğu değerlerde korozyon potansiyeli en düşük değerdedir. Bu da su kürüne maruz bırakılan numuneler için su / bağlayıcı oranının en belirleyici faktör olduğu şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.28 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,03 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi

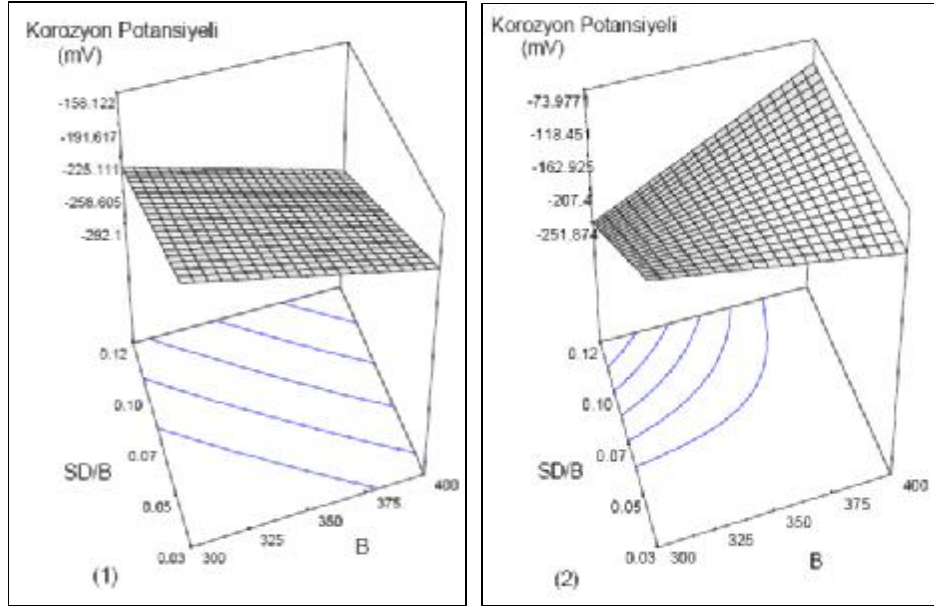


Şekil 4.29 : Hava kürü (1) ve su kürü (2) uygulanmış silis dumani/bağlayıcı oranı 0,07 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi

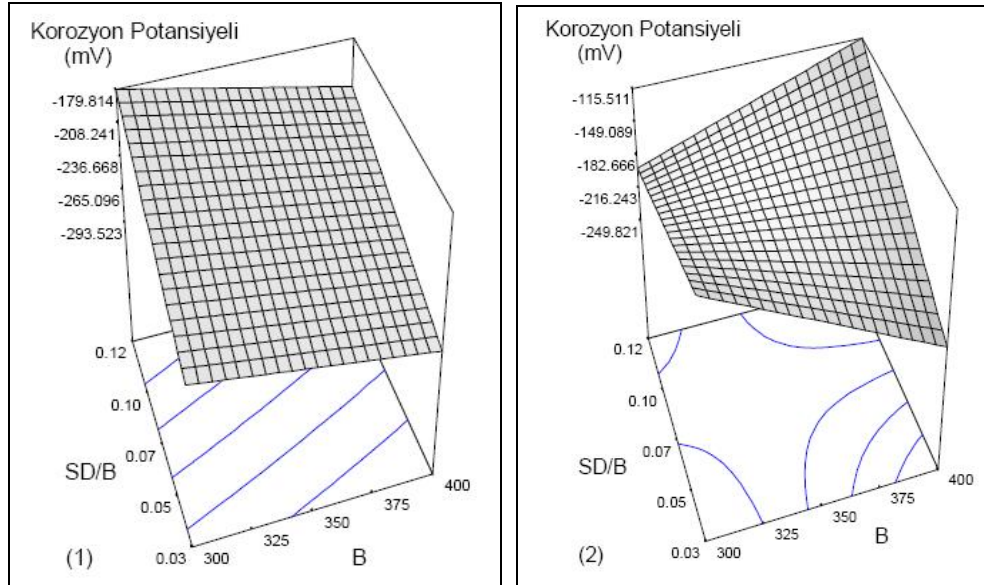


Şekil 4.30 : Hava kürü (1) ve su kürü (2) uygulanmış silis dumani/bağlayıcı oranı 0,12 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi

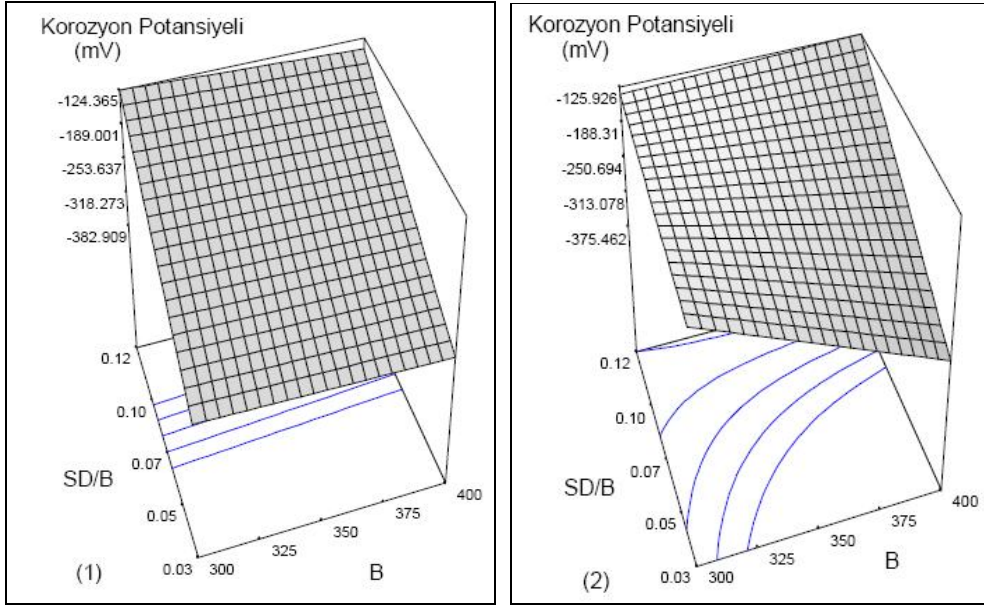
Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da görüldüğü gibi 0,03, 0,07 ve 0,12 silis dumani / bağlayıcı oranına sahip betonların hepsinde su / bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte korozyon potansiyeli değerlerinin azaldığı, dolayısı ile korozyon riskinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, beklendiği gibi yüksek su / bağlayıcı oranına sahip betonlarda korozyon riskinin daha yüksek olduğu şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.31 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi



Şekil 4.32 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi



Şekil 4.33 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin korozyon potansiyeli analizi

Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’ de görüldüğü gibi 0,48, 0,53 ve 0,58 su / bağlayıcı oranına sahip betonlar incelendiğinde 0,53 ve 0,58 oranındakilerde silis dumanı / bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte korozyon potansiyelinin arttığı yani korozyon riskinin azaldığı söylenebilir. Düşük su / bağlayıcı oranlarında (0,48) ise su / bağlayıcı oranının daha baskın olması nedeni ile silis dumanı / bağlayıcı oranının etkisinin daha sınırlı kaldığı gözlenmektedir.

4.3.3 Özdirenç

Elde edilen özdirenç değerleri su ve havada tutulmuş numuneler için analiz edilmiş ve üç boyutlu grafiklerde farklı oranlarda bağlayıcı, silis dumanı ve su içeren karışımların özdirençlerinde meydana gelen değişiklikler izlenmiştir. Oluşturulan fonksiyon denklem (4.3)’ de, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Çizelge 4.6’ da verilmiştir.

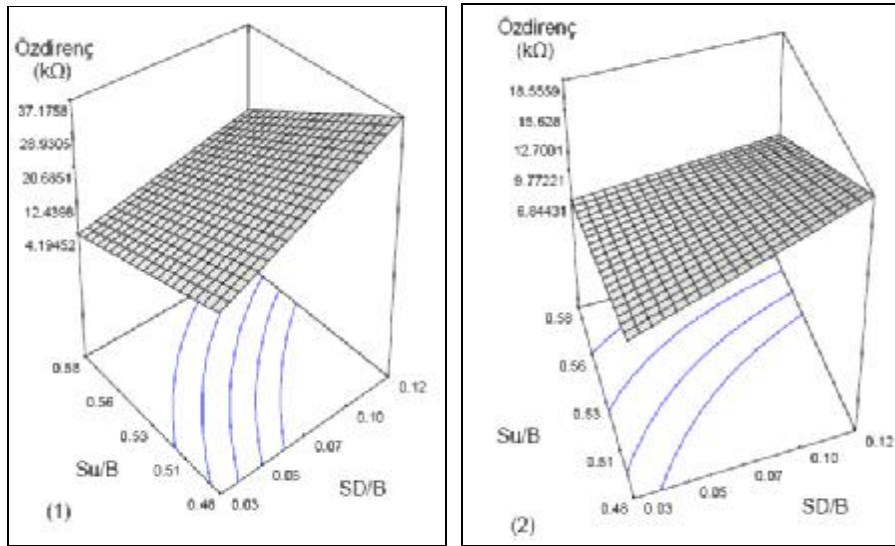
$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (B) + \alpha_2 \cdot (SD/B) + \alpha_3 \cdot (Su/B) + \alpha_4 \cdot (B) \cdot (SD/B) + \alpha_5 \cdot (B) \cdot (Su/B) + \alpha_6 \cdot (SD/B) \cdot (Su/B) \quad (4.3)$$

Denklem 4.3’ e göre bağlayıcı dozajı özdirenci olumsuz olarak etkilerken, su / bağlayıcı oranının azalması ve silis dumanı / bağlayıcı oranının artması direnci olumlu olarak etkilemektedir.

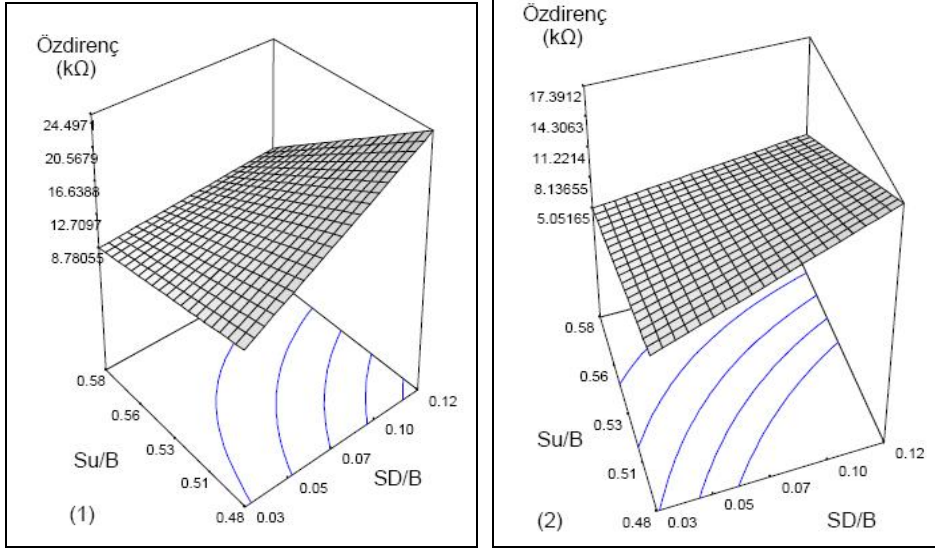
Çizelge 4.6' daki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hem hava kürleri hem de su kürleri için oluşturulan modellerin anlamlı oldukları görülmektedir. Buna göre; havada tutulan numuneler için oluşturulan fonksiyonda bağlayıcı, silis dumanı / bağlayıcı, su / bağlayıcı, (bağlayıcı*silis dumanı / bağlayıcı) ve (bağlayıcı* su / bağlayıcı) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kürü numuneleri için oluşturulan denklemde ise bağlayıcı, silis dumanı / bağlayıcı ve su / bağlayıcı değişkenlerinin fonksiyon sonucu üzerinde etkili oldukları anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.6 : Özdirenç değerleri için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri

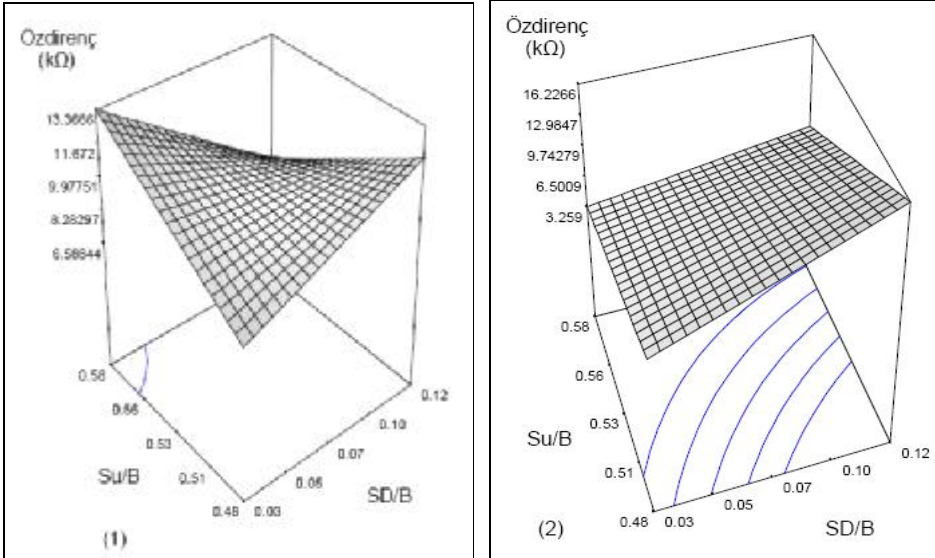
Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü $r^2=0,8212$	Su Kürü $r^2=0,8545$	Hava Kürü $r^2=0,8212$	Su Kürü $r^2=0,8545$
	a_0	13,91	9,80				
B	a_1	-4,05	-1,48	13,30	7,28	0,0030	0,0183
S. D. /B.	a_2	3,73	2,63	11,28	23,03	0,0051	0,0003
Su / B.	a_3	-4,13	-3,54	13,86	41,74	0,0026	<0,0001
B. (S.D/ B.)	a_4	-4,39	0,41	9,16	0,33	0,0097	0,5739
B. (Su / B.)	a_5	4,24	0,099	8,57	0,019	0,0118	0,8921
(S.D/ B) (Su /B.)	a_6	-2,73	-1,42	3,54	3,94	0,0825	0,0686
Oluşturulan Model				9,95	12,72	0,0003	<0,0001



Şekil 4.34 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 300 dozlu numunelerin özdirenç analizi



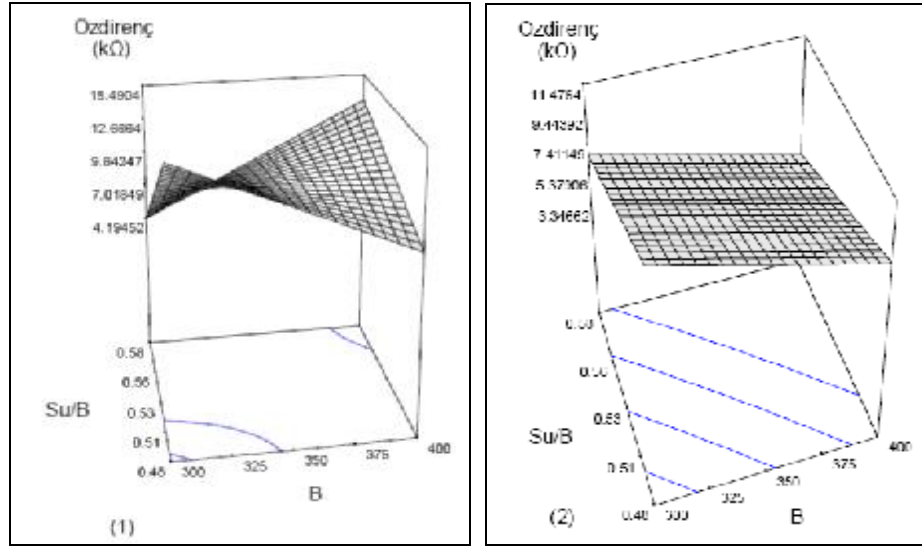
Şekil 4.35 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 350 dozlu numunelerin öz direnç analizi



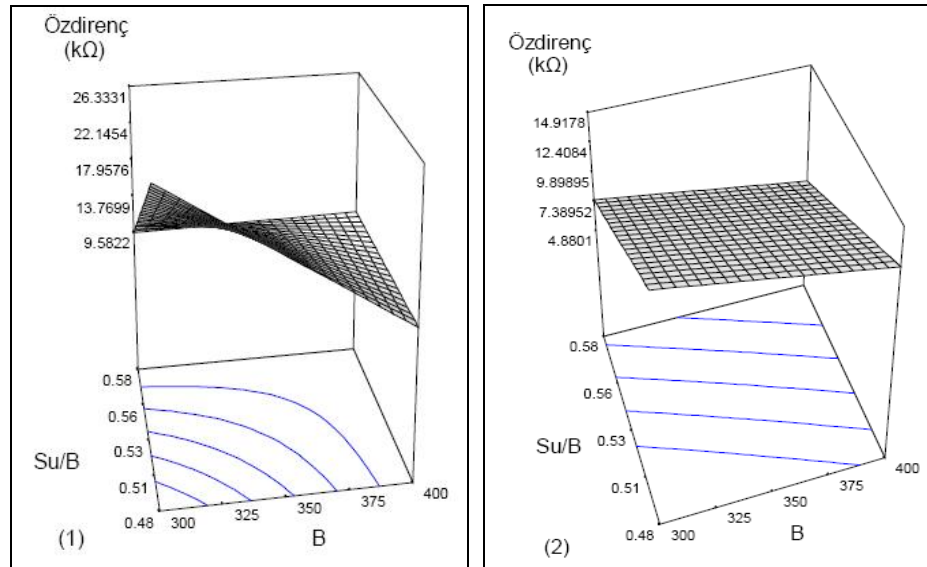
Şekil 4.36 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş 400 dozlu numunelerin öz direnç analizi

Şekiller 4.34, 4.35 ve 4.36' da verilen (1) ve (2) nolu grafikler karşılaştırıldığında sol taraftaki (havada tutulmuş) öz dirençlerin, sağ taraftakilerden (suda tutulmuş) düzey olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, genel eğilimle çelişmektedir; çünkü su kürünün olumlu etki yaparak öz direnci artırması beklenirken burada azalttığı gözlenmektedir. Bu çelişki, ölçüm sırasında numunelerin nem durumlarındaki farklılıklarından kaynaklanmakta, ölçüm sırasında yeterince kuru olmayan su kürü uygulanmış numunelerde iletkenliğin daha yüksek, dolayısı ile direncin daha düşük elde edilmesine neden olmuştur.

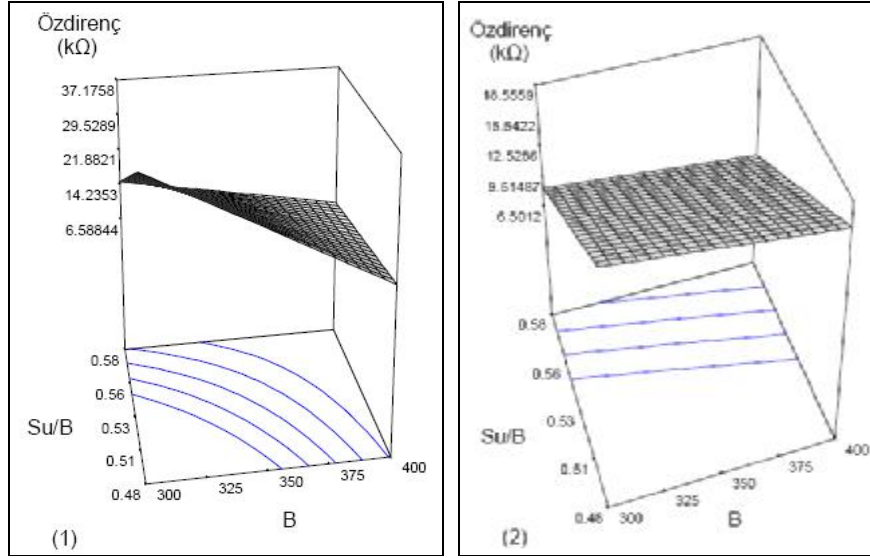
300 ve 350 dozlu numunelerde hem hava hem de su kürlerinde ve 400 dozlu numunelerin su kürlerinde benzer olarak su / bağlayıcı oranı azalıp silis dumanı / bağlayıcı oranı arttığında özdirenç değeri de artmıştır. Bu da silis dumanının betonun durabilitesini olumlu yönde etkilediğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.37 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,03 olan numunelerin özdirenç analizi

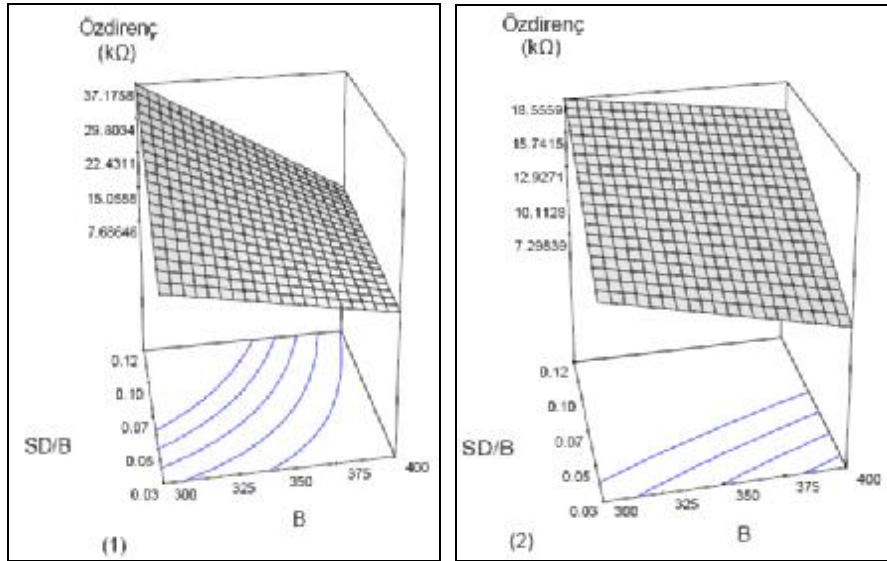


Şekil 4.38 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,07 olan numunelerin özdirenç analizi

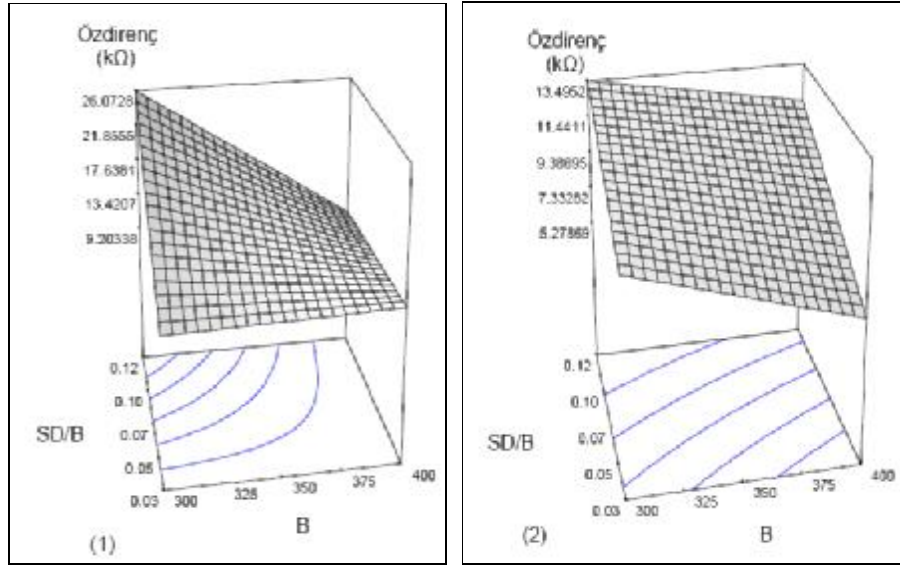


Şekil 4.39 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş silis dumanı/bağlayıcı oranı 0,12 olan numunelerin özdirenç analizi

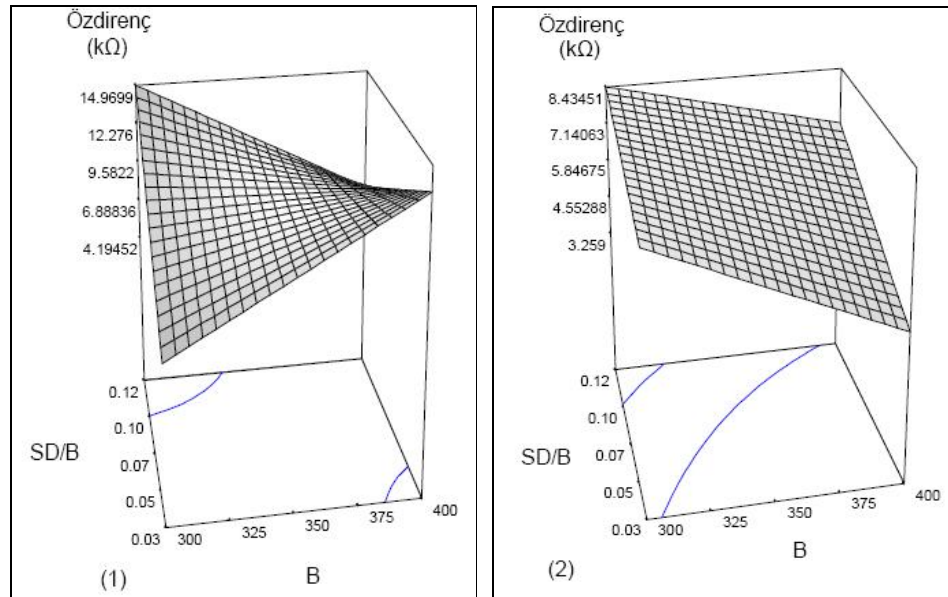
Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’ da görüldüğü gibi 0,03, 0,07 ve 0,12 silis dumanı / bağlayıcı oranına sahip betonların hepsinde su / bağlayıcı oranı azaldığında özdirenç değerinin arttığı görülmektedir. Bu da yüksek su oranının beton özdirenci üzerinde olumsuz bir etkisinin olduğunu kanıtlamaktadır. Silis dumanı / bağlayıcı oranı arttığında da betonların özdirençlerinin, düşük silis dumanı / bağlayıcı oranına sahip diğer numunelerden daha yüksek olduğu, silis dumanının betonun özdirencine katkıda bulunduğu şeklinde yorum yapılabilir.



Şekil 4.40 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin özdirenç analizi



Şekil 4.41 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin özdirenç analizi



Şekil 4.42 : Havada (1) ve suda (2) bekletilmiş su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin özdirenç analizi

Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’ de görüldüğü gibi 0,48, 0,53 ve 0,58 su / bağlayıcı oranına sahip betonlar incelendiğinde silis dumanı / bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte özdirençin de arttığı yani korozyona karşı daha dirençli oldukları söylenebilir. Bununla birlikte bağlayıcı miktarının azalması da özdirençte artışa neden olmuştur.

4.3.4 Korozyon başlangıç süreleri

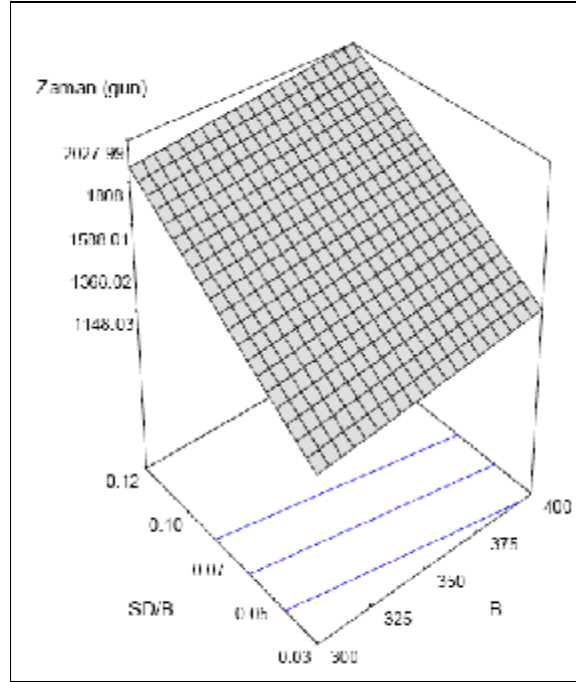
Numunelerin korozyona uğramaya başladıkları süreler havada tutulanlar için analiz edilmiş ve üç boyutlu grafiklerde farklı oranlarda bağlayıcı, silis dumanı ve su içeren numunelerin korozyon hızlarında meydana gelen değişiklikler izlenmiştir. Oluşturulan fonksiyon denklem (4.1)' de, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Çizelge 4.7' de verilmiştir.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1.(B) + \alpha_2.(SD / B) + \alpha_3.(Su / B) \quad (4.4)$$

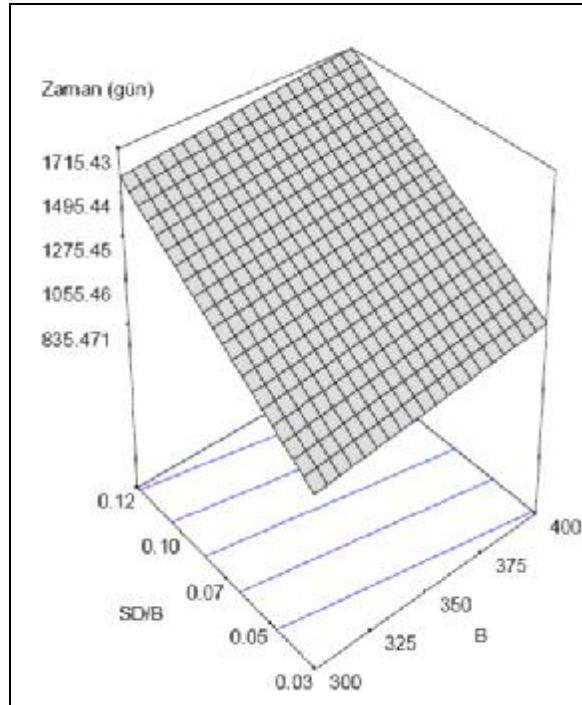
Çizelge 4.7' deki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde oluşturulan modelin anlamlı olduğu görülmektedir. Buna göre; oluşturulan fonksiyonda silis dumanı / bağlayıcı ve su / bağlayıcı değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Anlamlı olan değişkenler göz önüne alındığında silis dumanı / bağlayıcı oranının katsayısı pozitif olduğundan denklemin sonucunu olumlu yönde etkilediği söylenebilir yani korozyon başlangıç süresini geciktirir. Su / bağlayıcı oranının katsayısı negatiftir ve bu oranın rakamsal olarak artışı denklemin sonucunu olumsuz olarak etkiler yani korozyonun daha erken başlamasına neden olur.

Çizelge 4.7 : Havada tutulan numunelerde korozyon başlangıç süreleri için oluşturulan fonksiyonların katsayıları ve değişkenlerin fonksiyondaki anlamlılık dereceleri

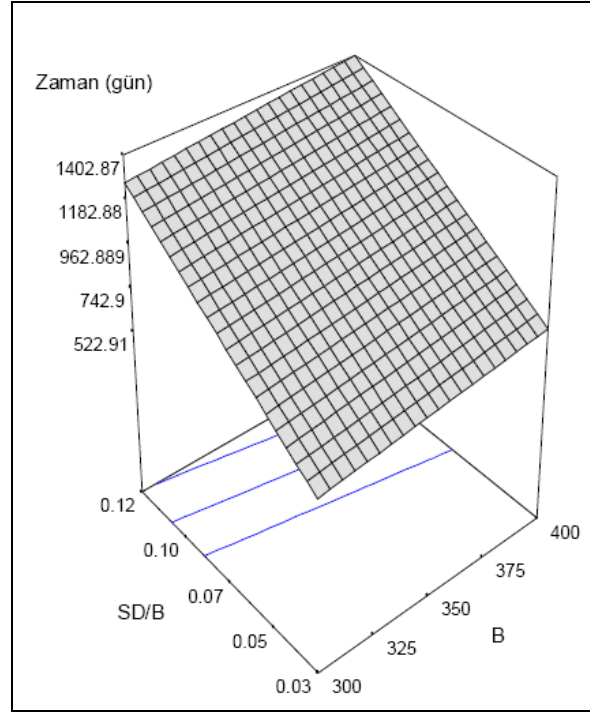
	Katsayı No	Katsayı	F-değeri $r^2=0,4461$	Anlamlılık derecesi
	a_0	1275,45		
B	a_1	67,91	0,25	0,6261
S. D. /B.	a_2	372,07	7,41	0,0151
Su / B.	a_3	-312,56	5,23	0,0362
Oluşturulan model			4,30	0,0211



Şekil 4.43 : Havada tutulan su/bağlayıcı oranı 0,48 olan numunelerin korozyon başlangıç süreleri analizi



Şekil 4.44 : Havada tutulan su/bağlayıcı oranı 0,53 olan numunelerin korozyon başlangıç süreleri analizi



Şekil 4.45 : Havada tutulan su/bağlayıcı oranı 0,58 olan numunelerin korozyon başlangıç süreleri analizi

Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da görüldüğü gibi farklı su / bağlayıcı oranına sahip numunelerin hepsinde silis dumanı / bağlayıcı oranı arttığında korozyon başlangıç süresi de uzamıştır. Buna ilave olarak su / bağlayıcı oranının artışı ile birlikte korozyon başlangıç süresi kısalmıştır.

5. GENEL SONUÇLAR

Silis dumanı katkılı beton numunelerin içinde gömülü çelik donatının klorür etkisindeki korozyonunun araştırıldığı bu çalışma kapsamında, farklı oranlarda silis dumanı içeren beton numunelerin belirli aralıklarla lineer polarizasyon yöntemi uygulanarak korozyon potansiyelleri, korozyon hızları ve özdirençleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda korozyon başlangıcı aşamasında olduğu anlaşılan numunelerin farklı derinliklerde tozu çıkartılarak potansiyometrik titrasyon yöntemi ile klorür içerik oranı tayin edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

Korozyon hızı ölçümleri sonucunda havada tutulan beton numuneler içerisinde korozyon başlangıcı olarak kabul edilen korozyon hızı değerine su/bağlayıcı oranı yüksek ve silis dumanı oranı düşük betonlar, su kürü uygulanmış numunelere göre daha erken ulaşmıştır. Su kürünün korozyon hızını düşürme yönünde etkili olduğu gözlenmiştir.

Hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan deneylerde, korozyon başlama süreleri açısından korozyon hızı ve korozyon potansiyeli ölçümlerinin birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Aktif korozyon görülen numunelerde beklendiği üzere korozyon hızlarının taralı bölgenin üst kısmına, korozyon potansiyellerinin ise daha negatif değerlere, yani kritik bölgenin alt kısmına doğru ilerlediği görülmüştür.

Aktif korozyon bölgesine geçiş yapan numunelerin korozyon hızları ve korozyon potansiyeli grafiklerinin birbirleriyle uyumlu olarak ilerlediği anlaşılmıştır.

Havada tutulmuş betonların özdirençleri incelendiğinde, silis dumanı katılmamış beton numunesinin, ilk ölçümlerden itibaren sınır değer olan $10k\Omega$ 'un altına düştüğü görülmüştür. Ayrıca su/bağlayıcı oranı yüksek olan ve aynı zamanda geçirimsizlik deneylerinde kötü performans sergileyen beton numunelerinin de özdirenç değerlerinin sınır değerinin altına düştüğü belirlenmiştir. Su kürü uygulanmış beton numunelerinin özdirenç değerleri havada tutulmuş betonlara benzer şekilde seçilen

parametrelerden etkilenmiş, ancak ölçüm sırasında numunelerin nemli olması nedeni ile daha düşük elde edilmiştir.

Klorür penetrasyon derinliğinde benzer davranan S7, S11 ve S17 numunelerinin aynı silis dumanı/bağlayıcı oranına sahip olmasının su/bağlayıcı oranına göre daha belirleyici olduğu düşünülmektedir. Düşük silis dumanı/bağlayıcı oranı ve benzer su/bağlayıcı oranına sahip S4 ve S8 numuneleri de benzer klorür penetrasyon derinliğine sahiptir.

Klorür konsantrasyonları analiz sonuçlarına göre yapılan çalışma süresince klorür etkisinden en çok zarar gören numune grubunun silis dumanı içermeyen S4 Hava olduğu söylenebilir. Diğerleri ile karşılaştırıldığında en yüksek klorür konsantrasyonu değerinde 10 kata kadar varan bir farklılık olduğu anlaşılmıştır. Bu da silis dumanının klorür etkisine karşı dayanımı olumlu yönde etkilediği şeklinde yorumlanabilir.

İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda genel olarak beklendiği gibi silis dumanı / bağlayıcı artışının korozyona karşı dayanıklılığı arttırdığı ve su / bağlayıcı oranının korozyona karşı dayanıklılığı azalttığı söylenebilir.

Korozyon başlama süreleri dikkate alındığında silis dumanı / bağlayıcı oranının artışının korozyon başlangıç süresini kısalttığı, su / bağlayıcı oranının artışının da korozyonun daha erken başlamasına neden olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Mather, B.**, 2004. Concrete Durability, *Cement and Concrete Composites*, **26**, pp. 3-4.
- [2] **Tikalsky, P. J., Mather, B. ve Olek, J.**, 2009. *Committee on Durability of Concrete*. Concrete Durability
- [3] **Türker, P. ve Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A.**, 2004. *Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*, Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara
- [4] **Tokay, M. ve Erdoğan, K.**, 2005. *Cüruflar ve cüruflu çimentolar*, Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [5] **Yeğınobalı, A.**, 2003. *Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [6] **ACI Committee 234**, 1996. *Guide for the use of silica fume in concrete*, American Concrete Institute, **96**, Detroit, USA.
- [7] **Yüzer, N.**, 1998. Silis dumanı katkılı betonarme elemanlara klorür etkisinin hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılması, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A. ve Brooks, J. J.**, 2004. Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, *Cement and Concrete Composites*, **26**, 347-357
- [9] **Dotto, J. M. R., De Abreu, A.G., Dal Molin, D.C.C. ve Müller, I.L.**, 2004. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars, *Cement and Concrete Composites*, **26**, pp. 31-39.
- [10] **Page, C. L., Short, N. R. and Holden, W.R.**, 1986. Influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research*, **16**, pp. 79-86.
- [11] **Mangat, P. S. ve Molloy B.T.**, 1991. Influence of PFA, slag and micro silica on chloride induced corrosion of reinforcement in concrete, *Cement and Concrete Research*, **21**, pp. 819-834.
- [12] **Fontana, M. G.**, 1971., Corrosion engineering, *Corrosion*, **27**, pp. 127.
- [13] **Uhlig, H. H.**, 1971. *Corrosion and Corrosion Control*, Wiley, New York, USA
- [14] **Barneyback, R. S., and Diamand S.**, 1981. Expression and analysis of pore fluids from harden cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, **11**, pp. 279-285.
- [15] **Page, C. L., and Treadaway K.W.J.**, 1982. Aspects of electrochemistry of steel in concrete, *Nature*, **297**, pp.109-115.
- [16] **Verbeck G. J.**, 1975. Mechanism of corrosion in concrete, *Corrosion of*

- Metals in Concrete*, American Concrete Institute SP-49, pp. 21-38
- [17] **Townsend, H. E., Cleary H. J., Allegra L.**, 1981. Breakdown of oxide films in steel exposure to chloride solutions, *Corrosion*, **37**, pp. 384-391.
 - [18] **Mehta, P. K.**, 1977. Effect of cement composition on corrosion of reinforcing steel in concrete, *Chloride Corrosion of Steel in Concrete*, Eds., D.E. Tonono and S.W. Dean Jr., American Society for Testing and Materials STP 629, pp. 12-19.
 - [19] **Mehta, P.K. ve Monteiro, P. J. M.**, 2006 *Concrete: Microstructure, and Materials*, McGraw-Hill, New York, U.S.A.
 - [20] **Page, C. L.**, 1979. The corrosion of reinforcing steel in concrete: its cause and control, *Bulletin*, 77, *Institution of Corrosion Science and Technology*, UK.
 - [21] **Cabrera, J. G.** 1996. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion, *Cement and Concrete Composites*, **18**, pp. 47-59.
 - [22] **Monfore, G. E.**, 1968. Electrical resistivity of concrete, *Portland Cement Association Research and Development Laboratory Journal*, **10** (2), pp. 35-48.
 - [23] **Tomoshov, N. D.**, 1966. *Theory of Corrosion and Protection of Metals* , Mcmillan Co., New York, U.S.A.
 - [24] **Kobayashi, K., and Shuttoh K.**, 1991. Oxygen diffusion of various materials, *Cement and Concrete Research*, **21**, pp. 273-284.
 - [25] **Page, C. L., Short M. R, and Tarras El A.**, 1981. Diffusion of chloride ions in hardened cement paste, *Cement and Concrete Research.*, **11**, pp. 395-406.
 - [26] **Parrott, L. J.**, 1987. A Review of Carbonation in Reinforced Concrete, *Building Research Establishment*, Watford, UK.
 - [27] **González, J. A., Algaba S., and Andrade C.**, 1980. Corrosion of reinforcing bars in carbonated concrete, *British Corrosion Journal*, **3**, pp. 135-139.
 - [28] **Youping L.**, 1996. Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated ceinforced concrete Structures, *Doktora Tezi*, Virginia Polytechnic Institute and State University.
 - [29] **Mehta, P. K.**, 1993. *Concrete Structure, Properties and Materials* , Prentice-Hall, Inc., New Jersey, U.S.A.
 - [30] **Clear, K. C.**, 1983. *Chloride at the Threshold*, Report of Kenneth C. Clear Inc., **March**, pp. 1011.
 - [31] **Schiessl, P., and Raupach, M.**, 1990. Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete, *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Eds., C. L. Page, K. W. J. Threadaway, P. B. Bamfoth, pp. 49-58.
 - [32] **Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P. ve Polder, R.**, 2004. *Corrosion of Steel in Concrete*, Wiley-Vch, **6**, pp. 91-92.
 - [33] **ASTM C 876-91**, 1999. Standard test method for half cell potentials of

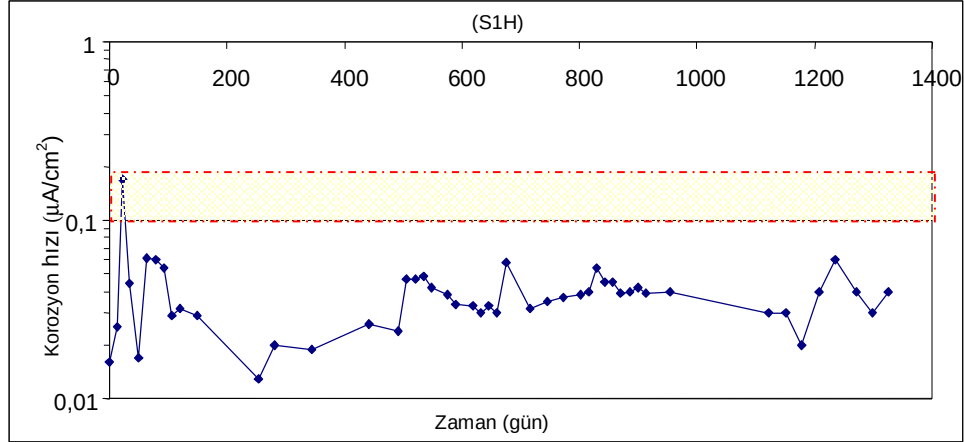
- reinforcing steel in concrete, *American Society for Testing and Materials*, U.S.A.
- [34] **Hoşhan, P.**, 1994. Beton içindeki çeliğin korozyonunun üç elektrot yöntemi ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [35] **Erdoğan, Ş.**, 2003. Betonda donatı korozyonu-ölçümü ve irdelenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler ve teknikler, 5. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye.
- [36] **Carino, N.**, 1999. Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **August**, 96-106.
- [37] **Kurt, E. B.**, 2007. Silis dumanının betonun duariblite özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İstanbul, Türkiye.
- [38] **ASTM C 1202**, 1997. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, *American Society for Testing and Materials*, U.S.A.

EKLER

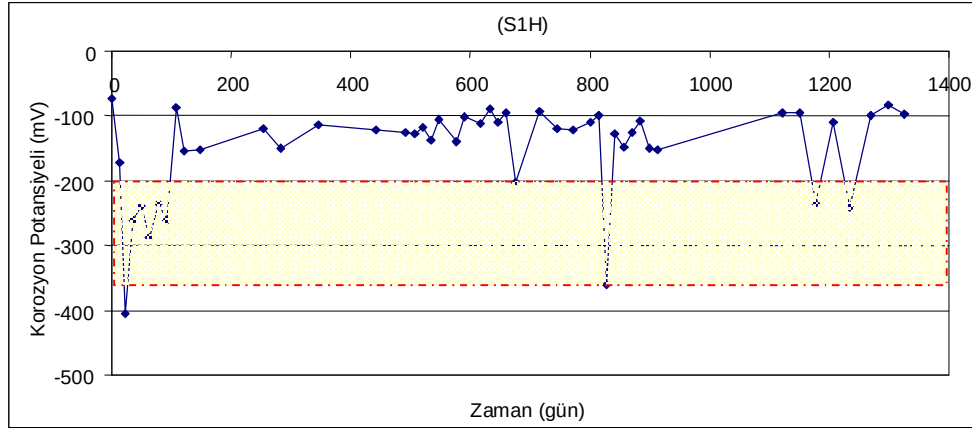
- EK A.1 :** Havada tutulan S1 numunelerine ait grafikler
- EK A.2 :** Suda tutulan S1 numunelerine ait grafikler
- EK A.3 :** Havada tutulan S2 numunelerine ait grafikler
- EK A.4 :** Suda tutulan S2 numunelerine ait grafikler
- EK A.5 :** Havada tutulan S3 numunelerine ait grafikler
- EK A.6 :** Suda tutulan S3 numunelerine ait grafikler
- EK A.7 :** Havada tutulan S4 numunelerine ait grafikler
- EK A.8 :** Suda tutulan S4 numunelerine ait grafikler
- EK A.9 :** Havada tutulan S5 numunelerine ait grafikler
- EK A.10 :** Suda tutulan S5 numunelerine ait grafikler
- EK A.11 :** Havada tutulan S6 numunelerine ait grafikler
- EK A.12 :** Suda tutulan S6 numunelerine ait grafikler
- EK A.13 :** Havada tutulan S7 numunelerine ait grafikler
- EK A.14 :** Suda tutulan S7 numunelerine ait grafikler
- EK A.15 :** Havada tutulan S8 numunelerine ait grafikler
- EK A.16 :** Suda tutulan S8 numunelerine ait grafikler
- EK A.17 :** Havada tutulan S9 numunelerine ait grafikler
- EK A.18 :** Suda tutulan S9 numunelerine ait grafikler
- EK A.19 :** Havada tutulan S10 numunelerine ait grafikler
- EK A.20 :** Suda tutulan S10 numunelerine ait grafikler
- EK A.21 :** Havada tutulan S11 numunelerine ait grafikler
- EK A.22 :** Suda tutulan S11 numunelerine ait grafikler
- EK A.23 :** Suda tutulan S12 numunelerine ait grafikler
- EK A.24 :** Havada tutulan S12 numunelerine ait grafikler
- EK A.25 :** Suda tutulan S13 numunelerine ait grafikler
- EK A.26 :** Havada tutulan S13 numunelerine ait grafikler
- EK A.27 :** Suda tutulan S14 numunelerine ait grafikler
- EK A.28 :** Havada tutulan S14 numunelerine ait grafikler
- EK A.29 :** Suda tutulan S15 numunelerine ait grafikler
- EK A.30 :** Havada tutulan S15 numunelerine ait grafikler
- EK A.31 :** Suda tutulan S16 numunelerine ait grafikler
- EK A.32 :** Havada tutulan S16 numunelerine ait grafikler
- EK A.33 :** Suda tutulan S17 numunelerine ait grafikler
- EK A.34 :** Havada tutulan S17 numunelerine ait grafikler
- EK A.35 :** Suda tutulan S18 numunelerine ait grafikler
- EK A.36 :** Suda tutulan S18 numunelerine ait grafikler
- EK A.37 :** Havada tutulan S19 numunelerine ait grafikler
- EK A.38 :** Suda tutulan S19 numunelerine ait grafikler
- EK A.39 :** Havada tutulan S20 numunelerine ait grafikler
- EK A.40 :** Suda tutulan S20 numunelerine ait grafikler

Çizelge A.1 : Havada tutulan S1 numunelerinin bileşim parametreleri

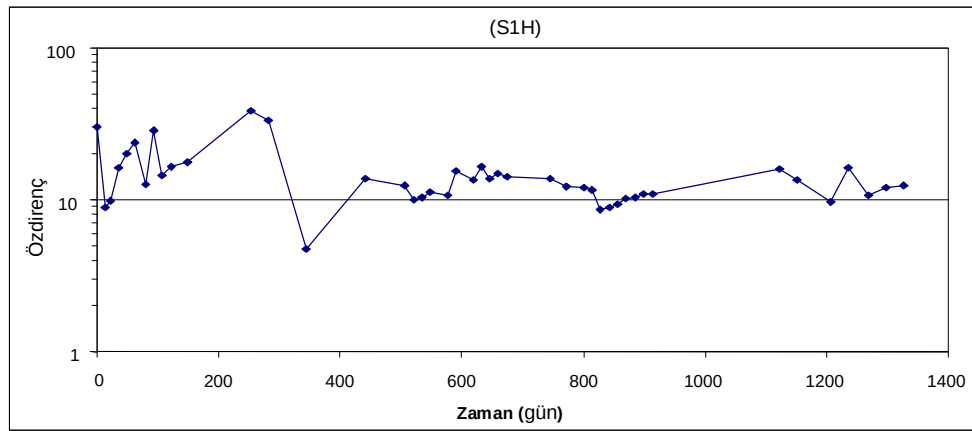
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

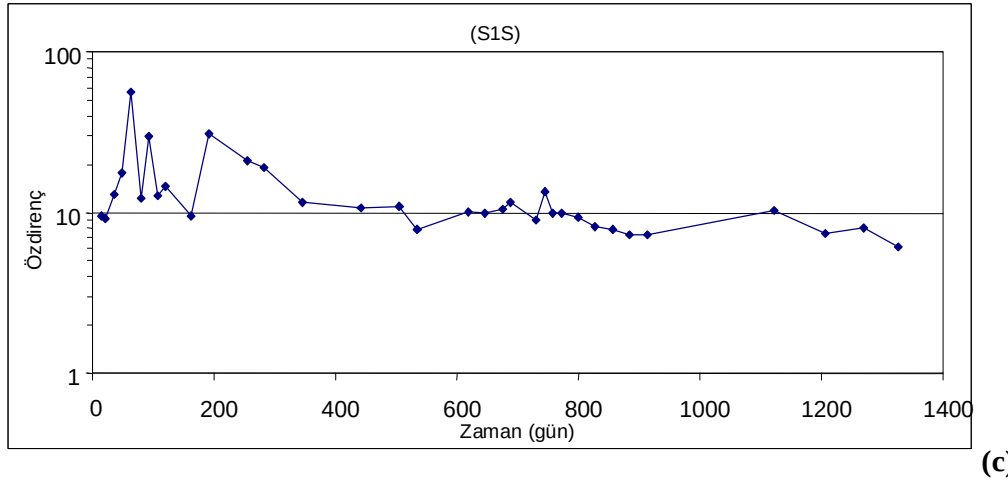
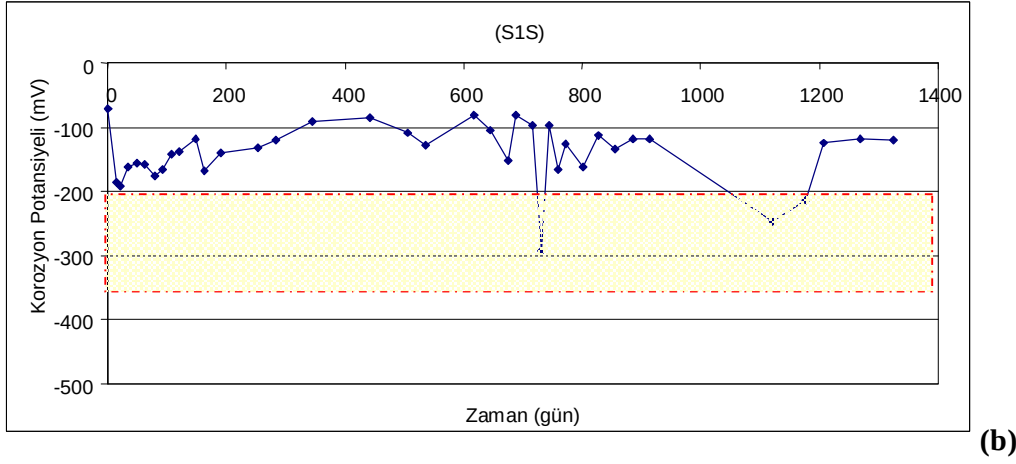
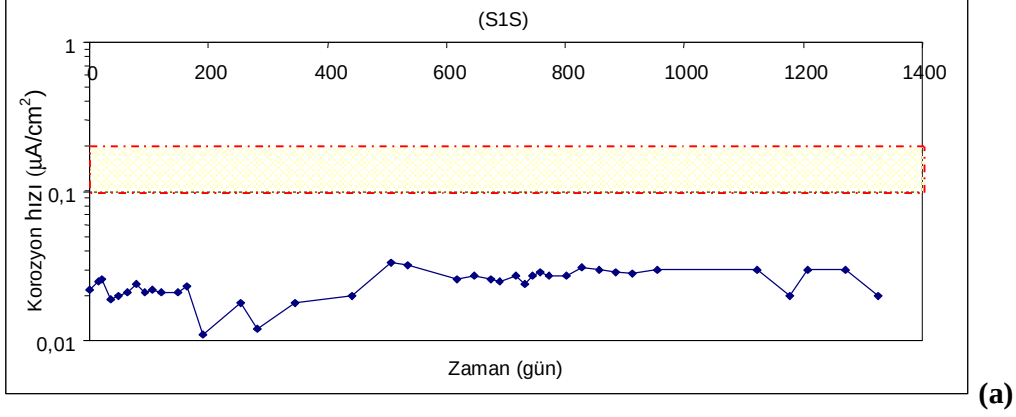


(c)

Şekil A.1 : Suda tutulan S1 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.2 : Suda tutulan S1 numunelerinin bileşim parametreleri

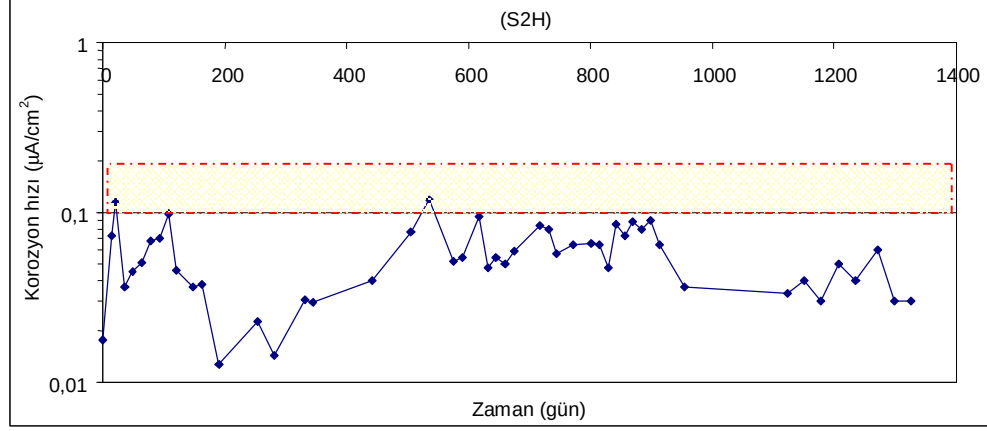
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



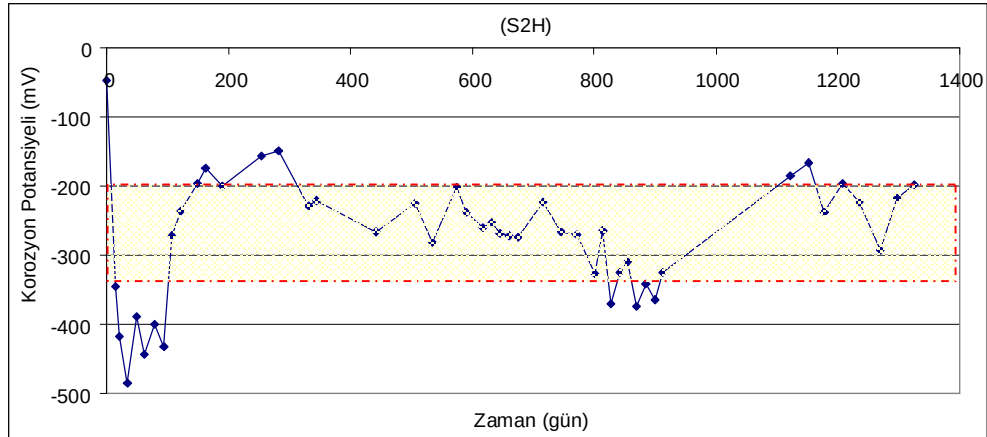
Şekil A.2 : Suda tutulan S1 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.3 : Havada tutulan S2 numunelerinin bileşim parametreleri

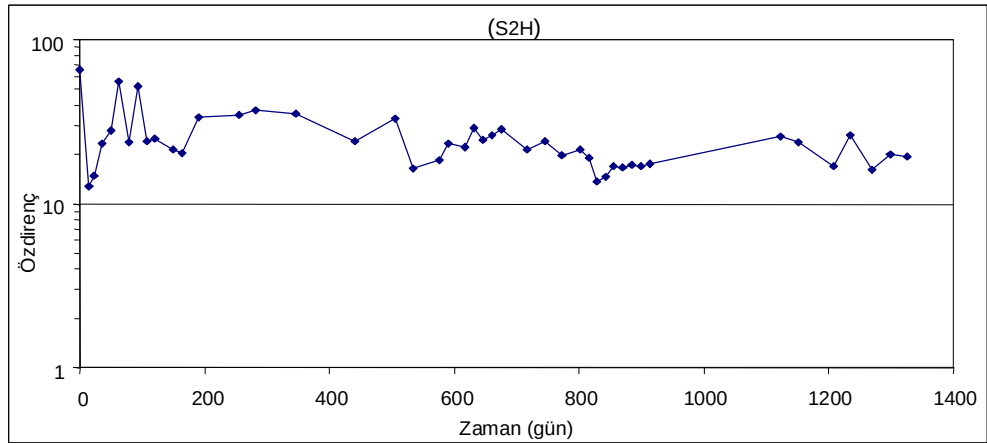
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

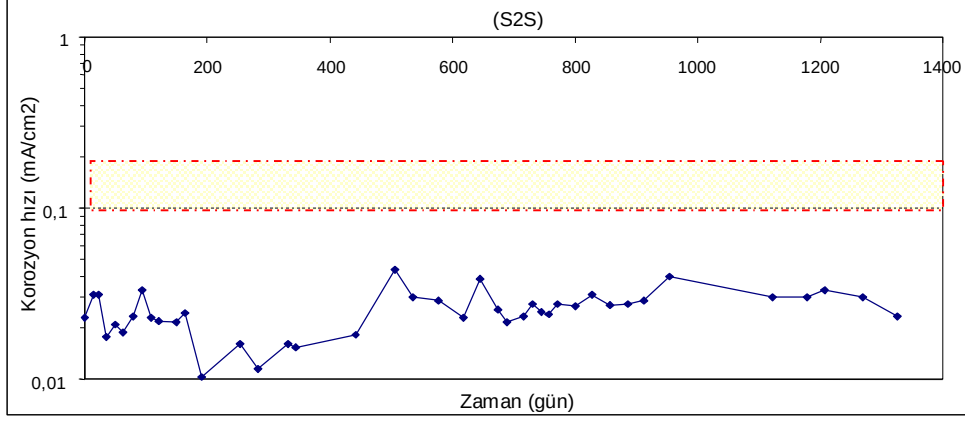


(c)

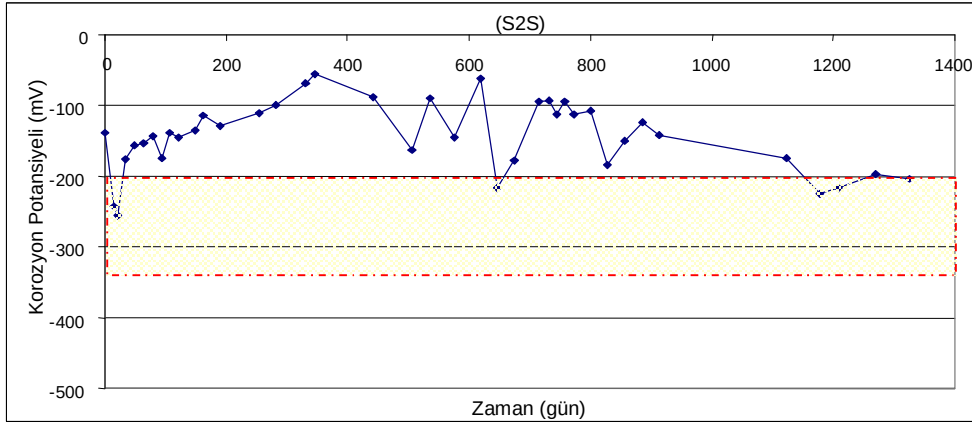
Şekil A.3 : Havada tutulan S2 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.4 : Suda tutulan S2 numunelerinin bileşim parametreleri

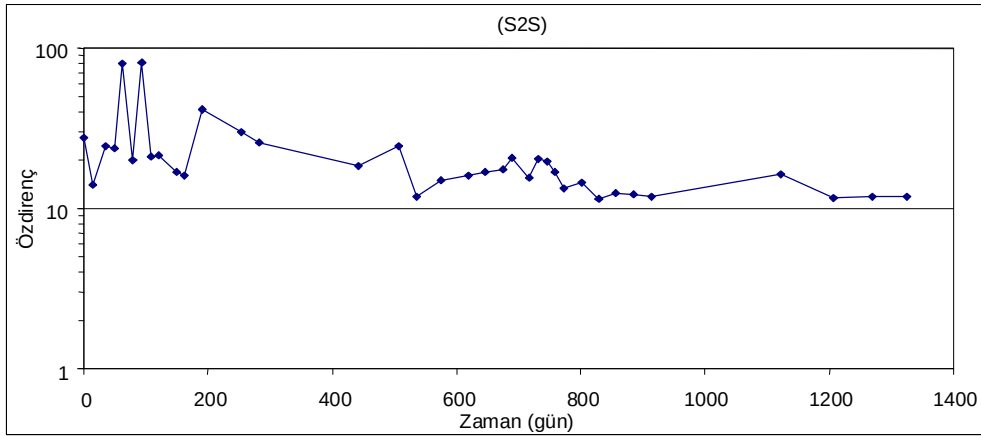
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

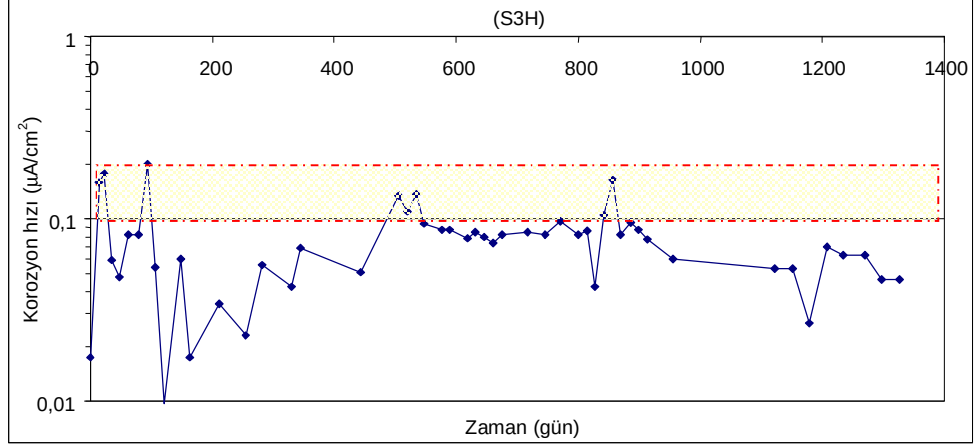


(c)

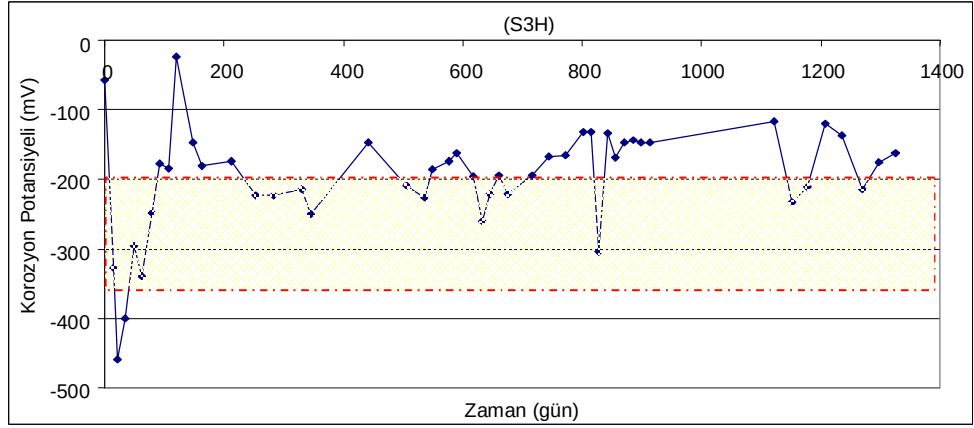
Şekil A.4 : Suda tutulan S2 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.5 : Havada tutulan S3 numunelerinin bileşim parametreleri

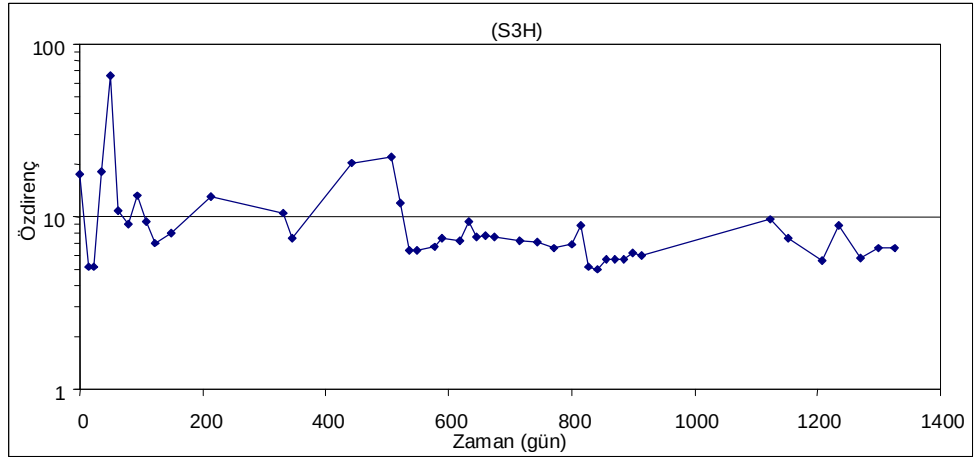
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
434,09	0,075	0,53



(a)



(b)

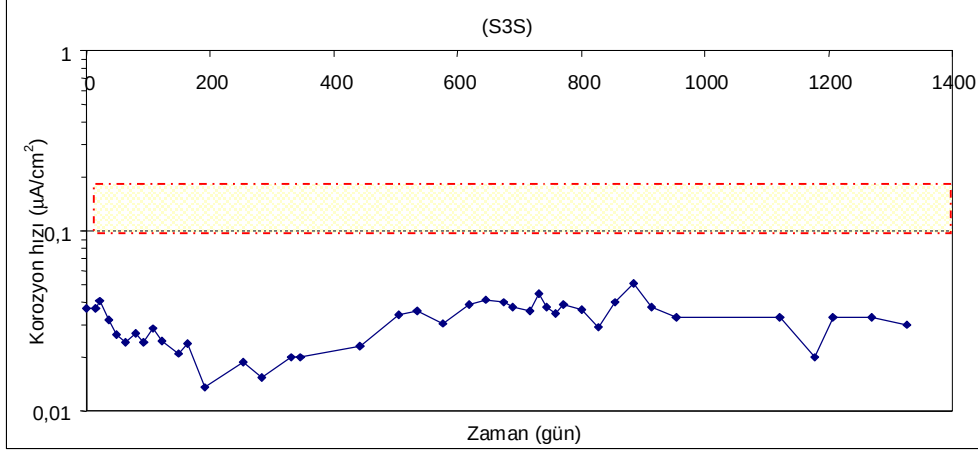


(c)

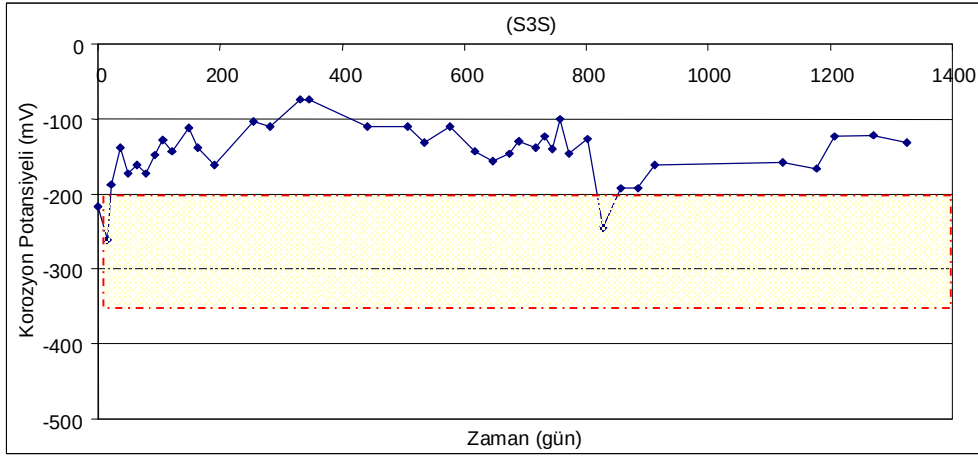
Şekil A.5 : Havada tutulan S3 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.6 : Suda tutulan S3 numunelerinin bileşim parametreleri

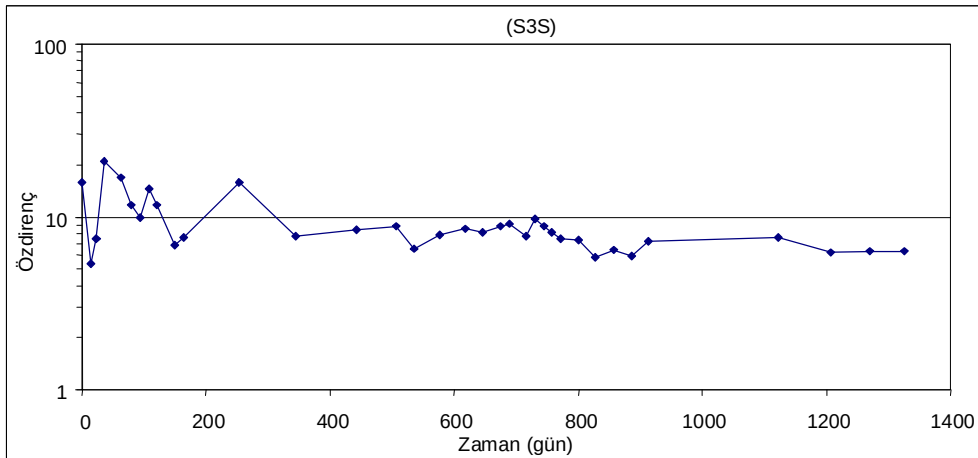
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
434,09	0,075	0,53



(a)



(b)

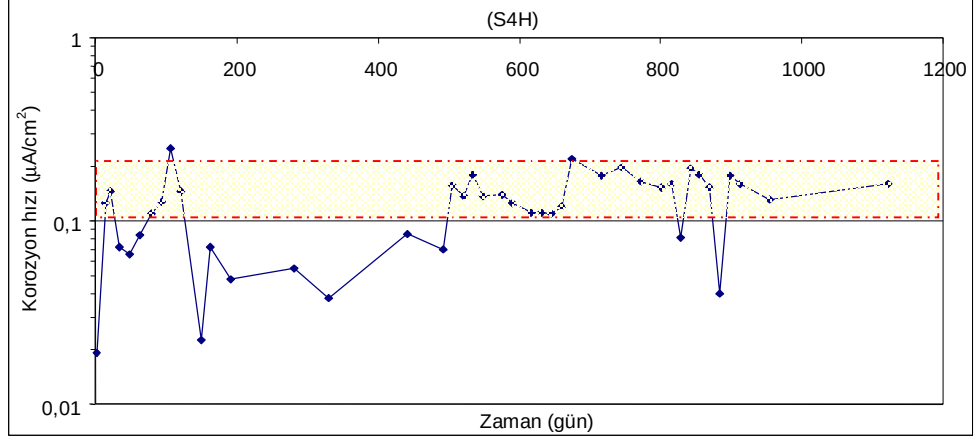


(c)

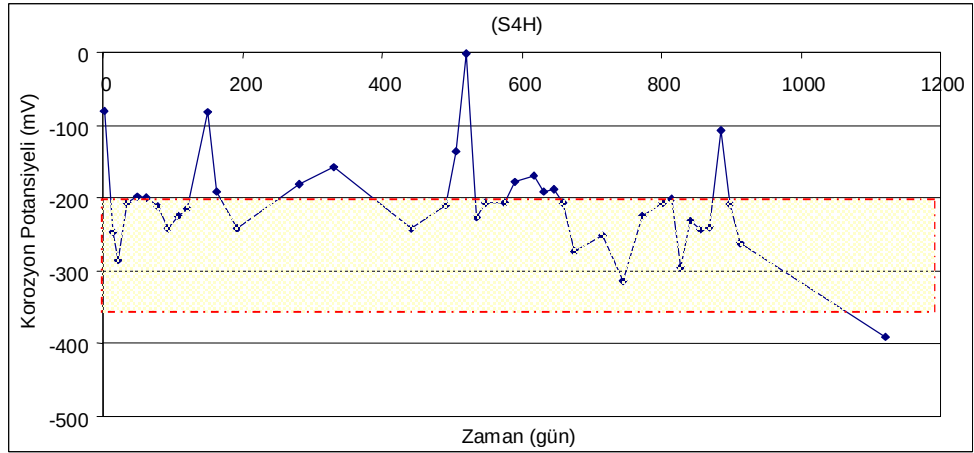
Şekil A.6 : Suda tutulan S3 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.7 : Havada tutulan S4 numunelerinin bileşim parametreleri

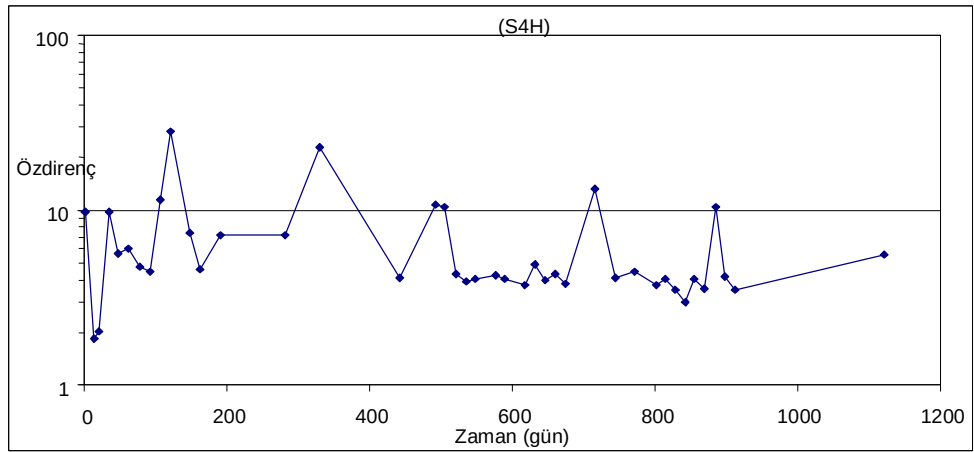
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,000	0,53



(a)



(b)

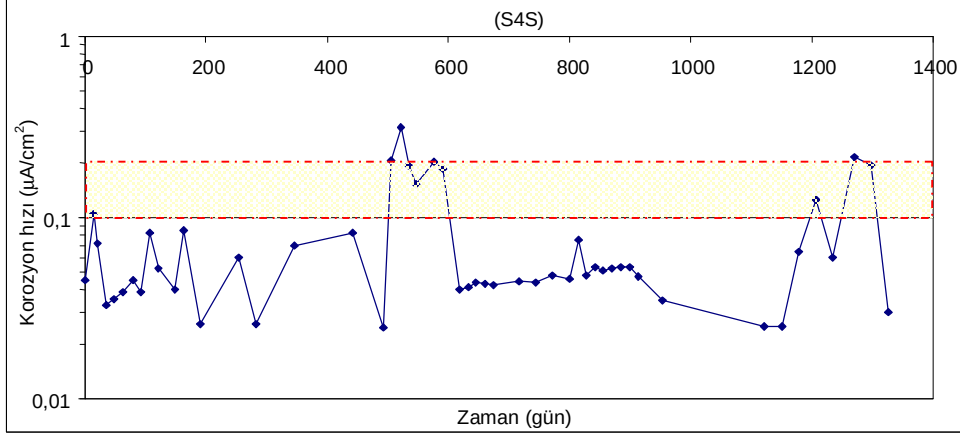


(c)

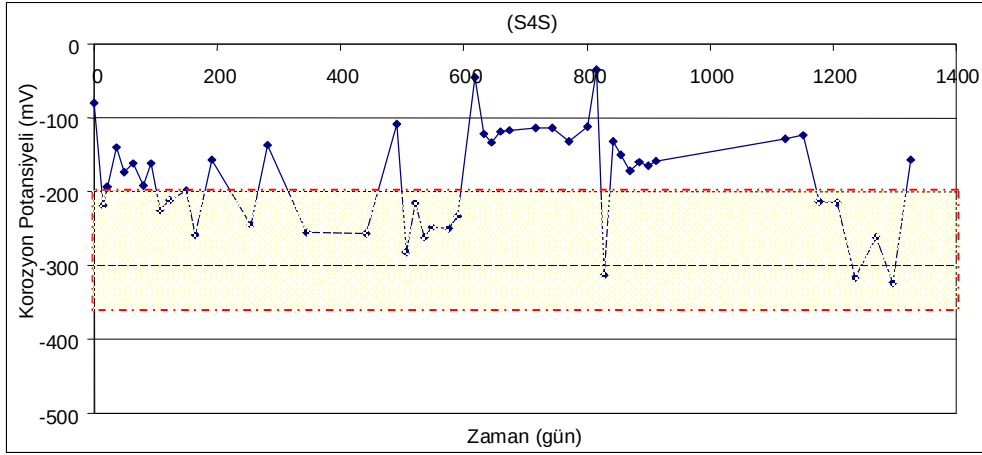
Şekil A.7 : Havada tutulan S4 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.8 : Suda tutulan S4 numunelerinin bileşim parametreleri

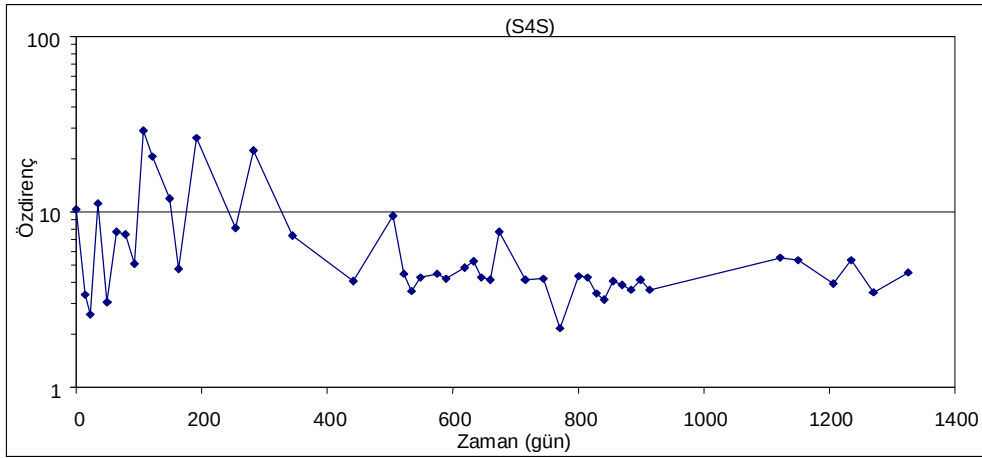
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,000	0,53



(a)



(b)

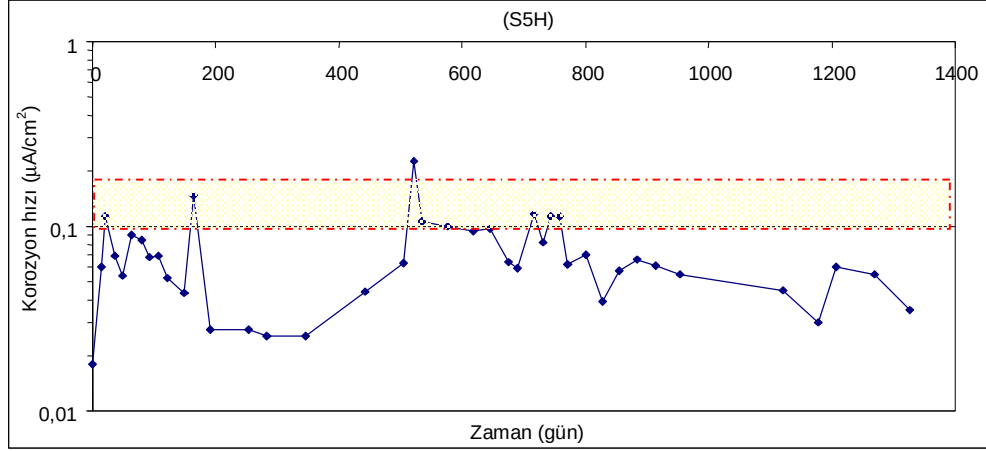


(c)

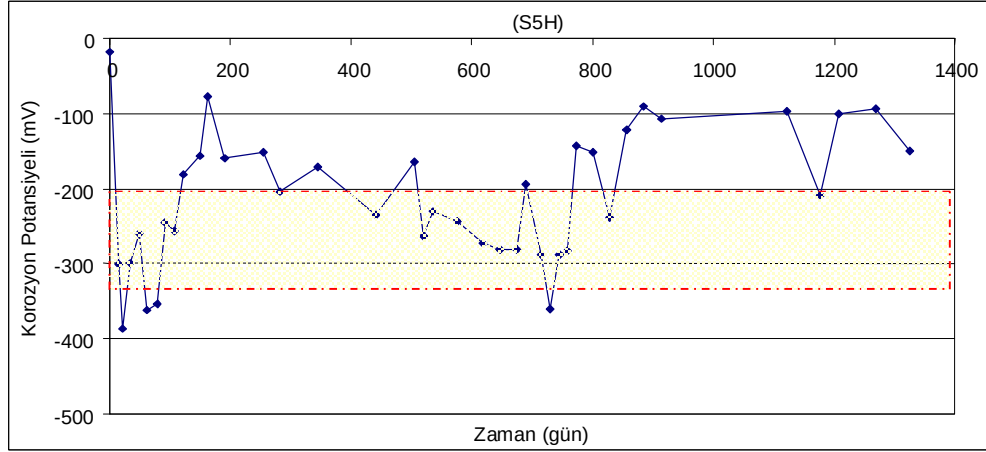
Şekil A.8 : Suda tutulan S4 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.9 : Havada tutulan S5 numunelerinin bileşim parametreleri

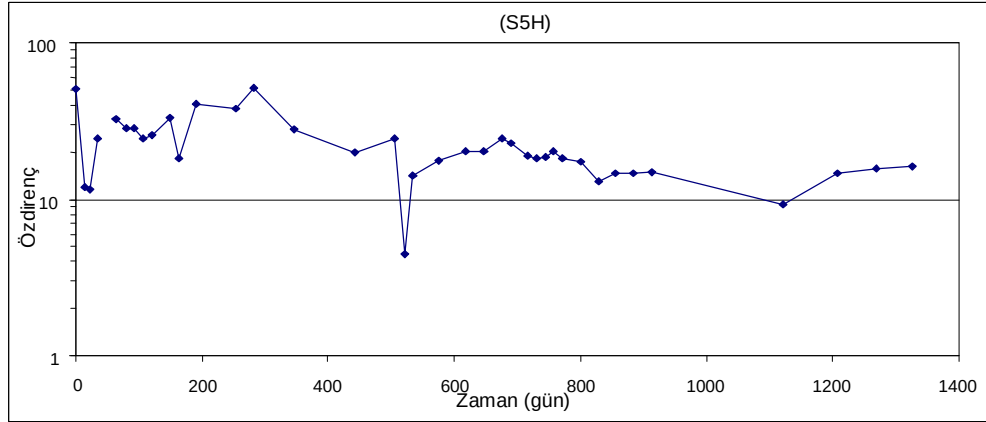
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,151	0,53



(a)



(b)

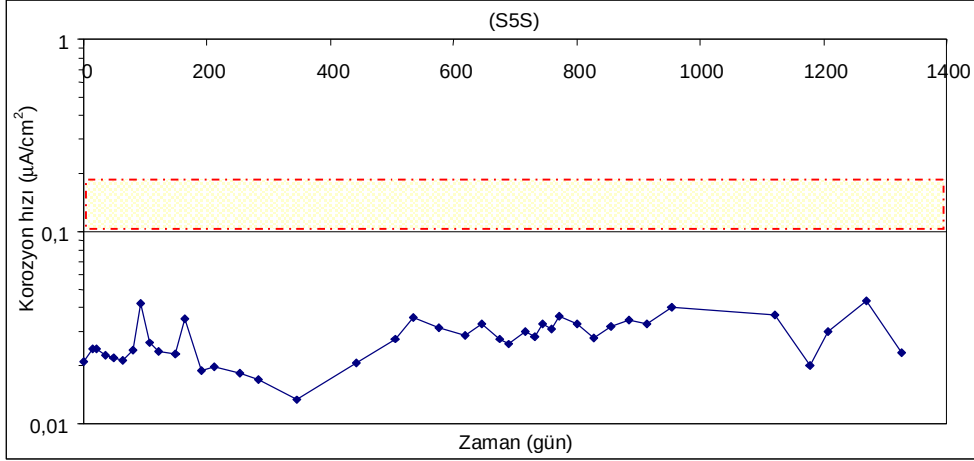


(c)

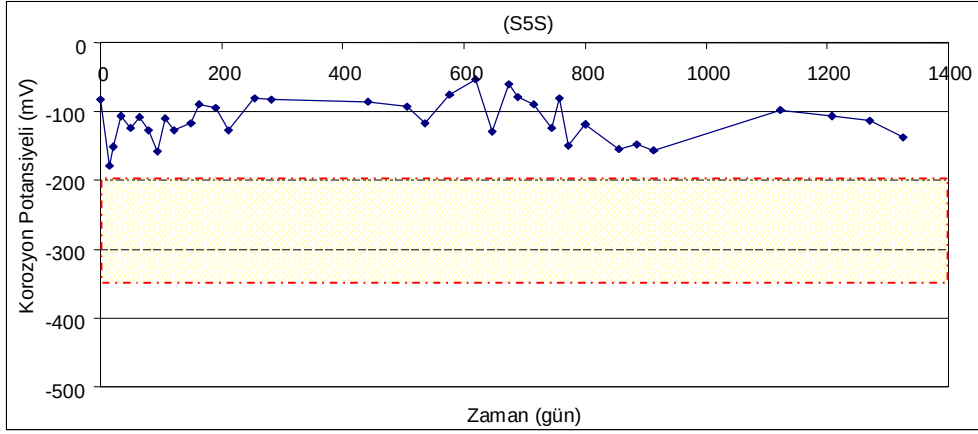
Şekil A.9 : Havada tutulan S5 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.10 : Suda tutulan S5 numunelerinin bileşim parametreleri

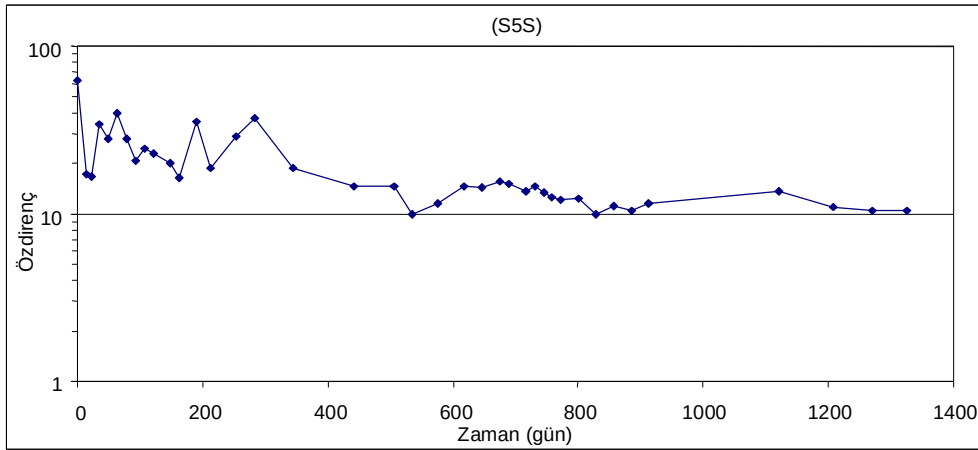
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,151	0,53



(a)



(b)

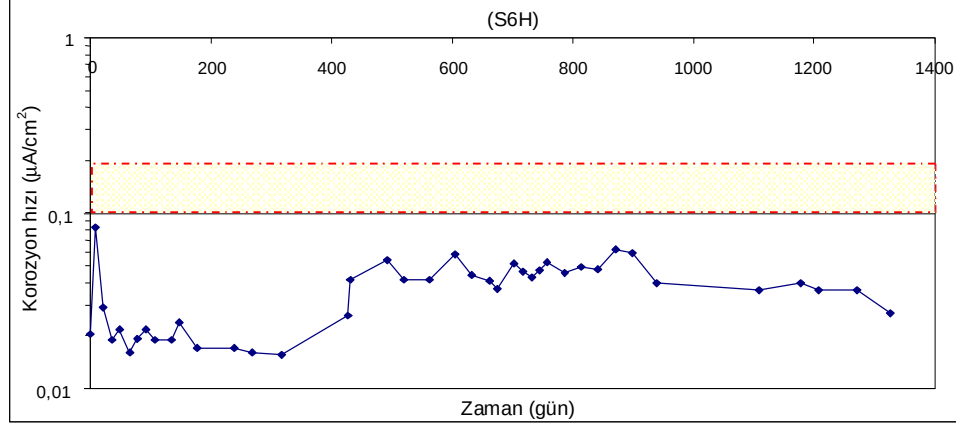


(c)

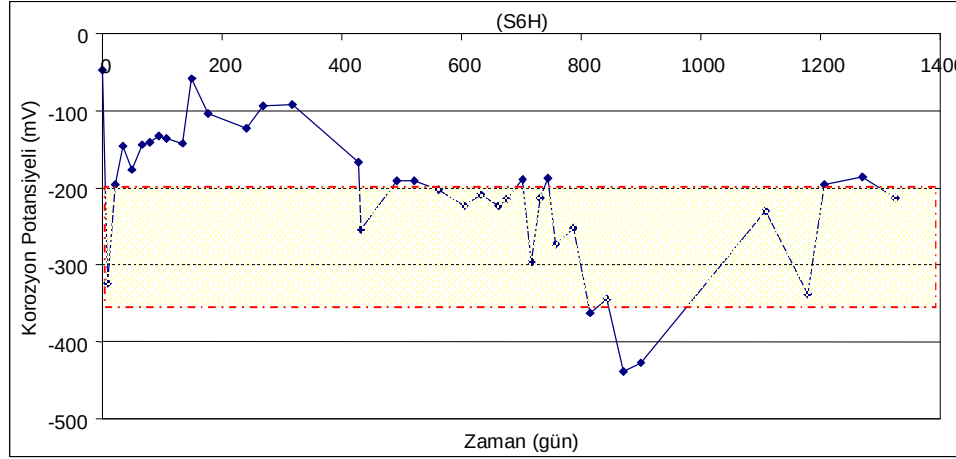
Şekil A.10 : Suda tutulan S5 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.11 : Havada tutulan S6 numunelerinin bileşim parametreleri

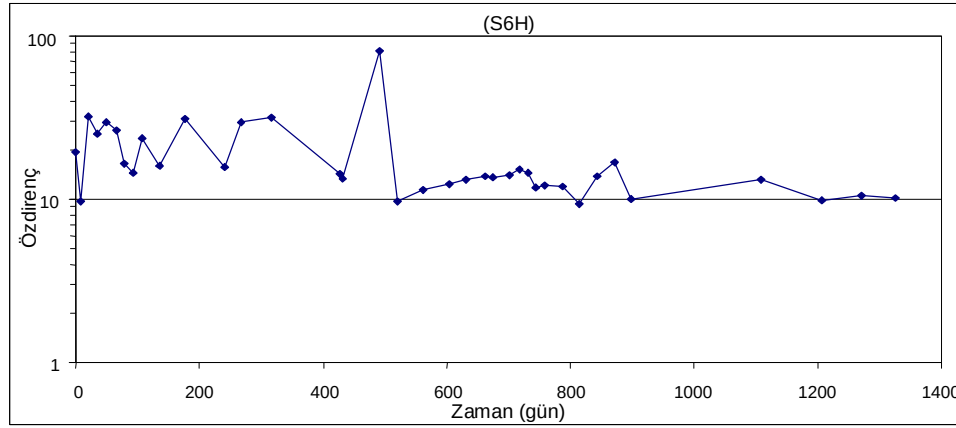
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,120	0,58



(a)



(b)

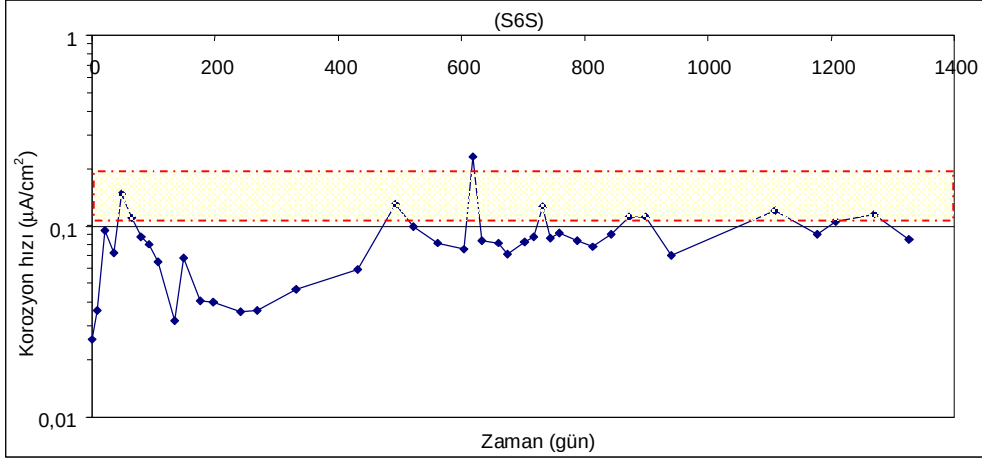


(c)

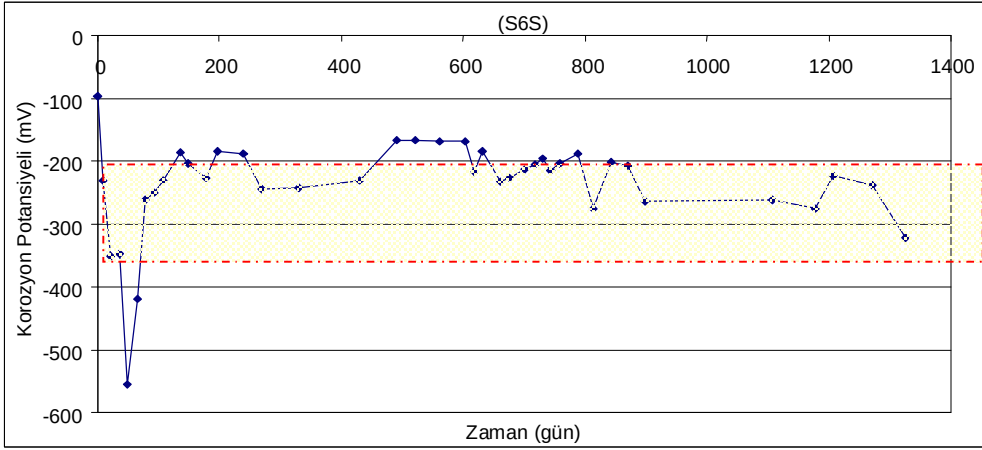
Şekil A.11 : Havada tutulan S6 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.12 : Suda tutulan S6 numunelerinin bileşim parametreleri

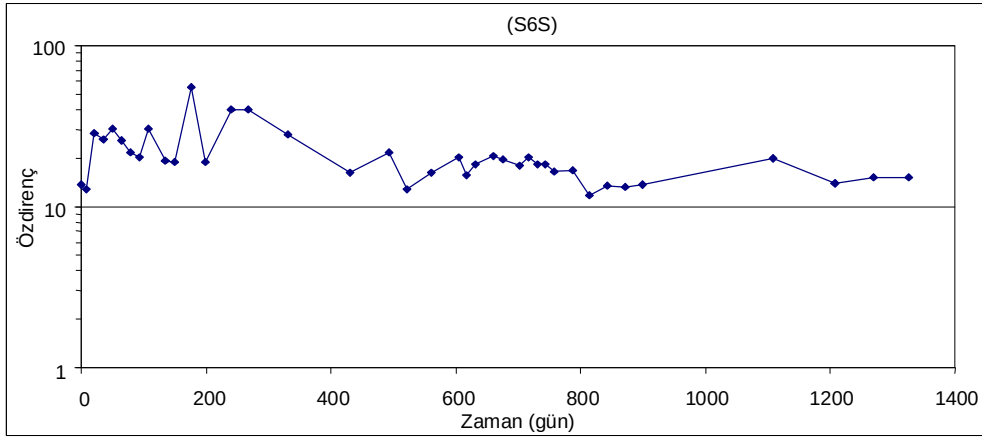
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,120	0,58



(a)



(b)

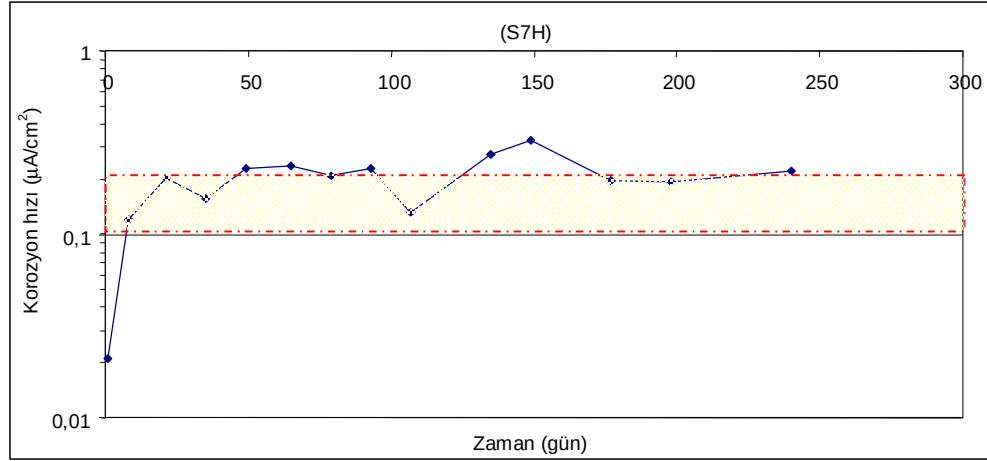


(c)

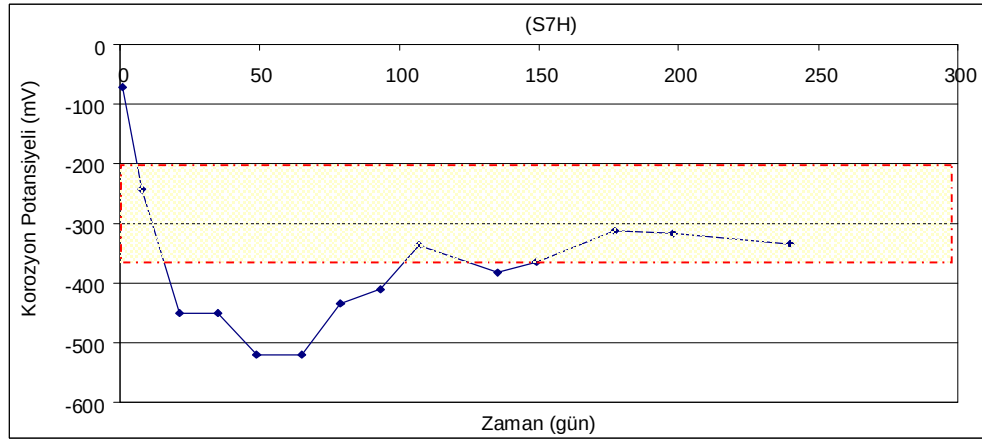
Şekil A.12 : Suda tutulan S6 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.13 : Havada tutulan S7 numunelerinin bileşim parametreleri

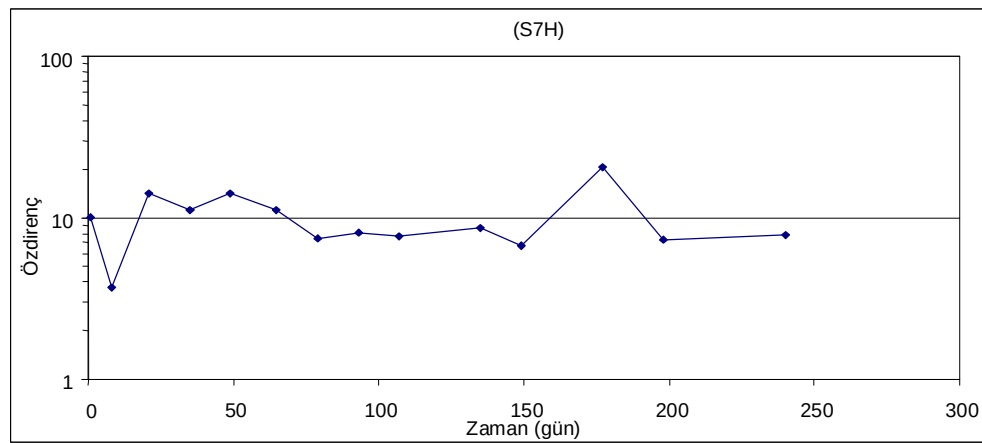
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,61



(a)



(b)

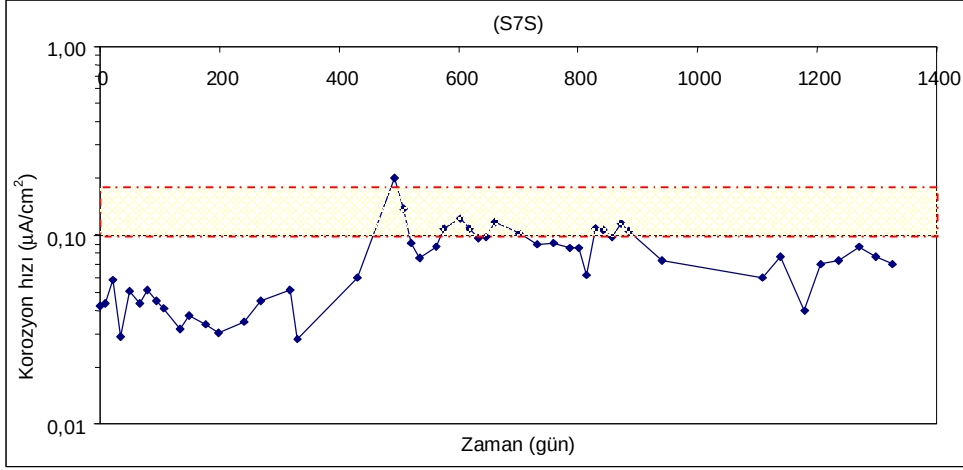


(c)

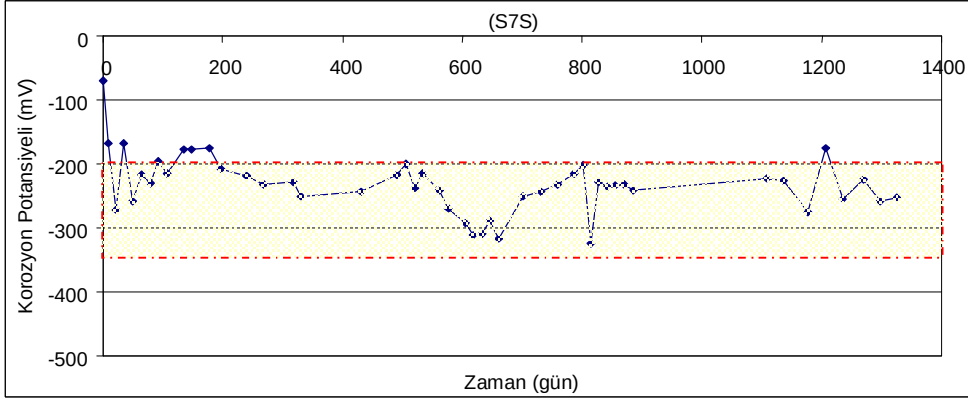
Şekil A.13 : Havada tutulan S7 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.14 : Suda tutulan S7 numunelerinin bileşim parametreleri

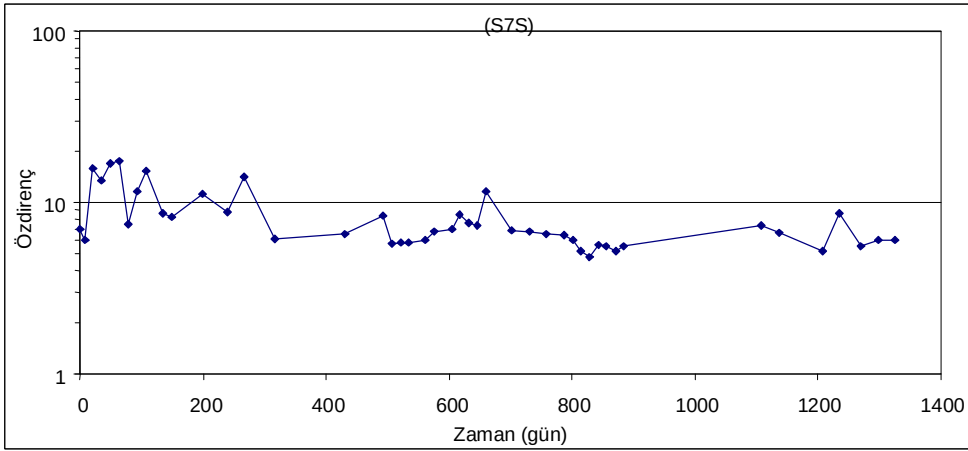
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,61



(a)



(b)

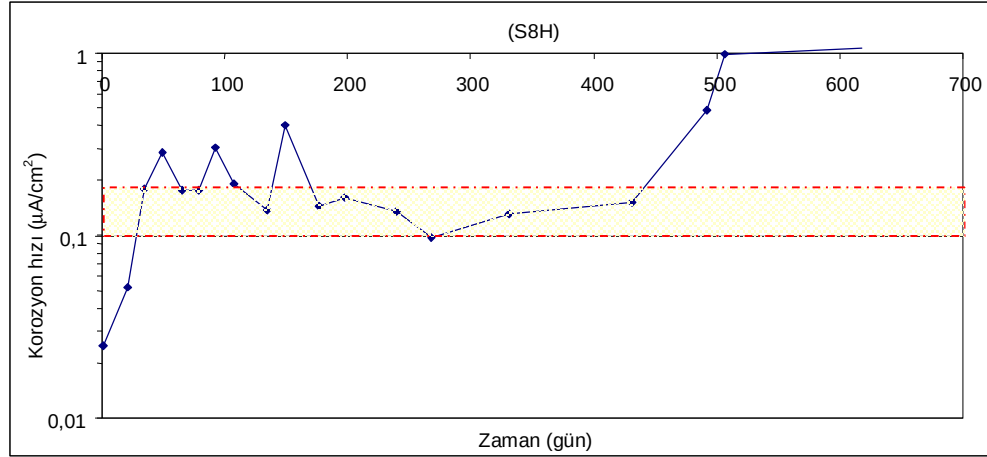


(c)

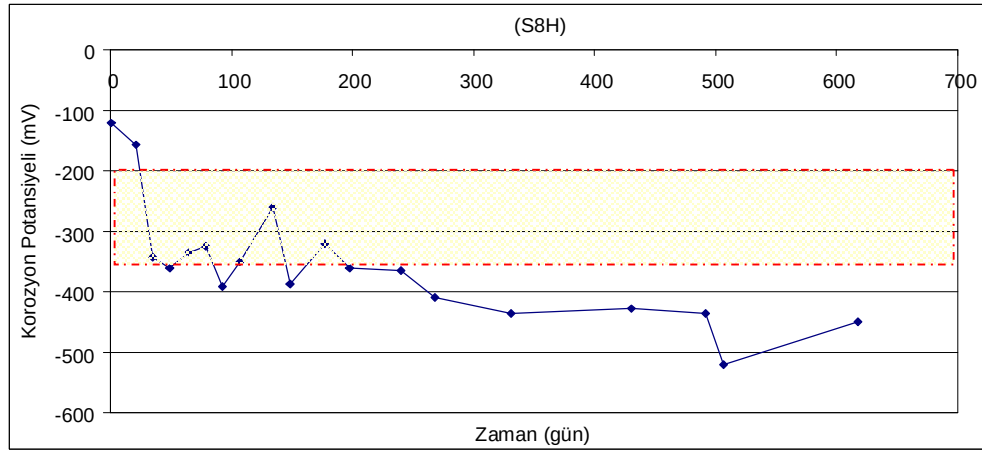
Şekil A.14 : Suda tutulan S7 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.15 : Havada tutulan S8 numunelerinin bileşim parametreleri

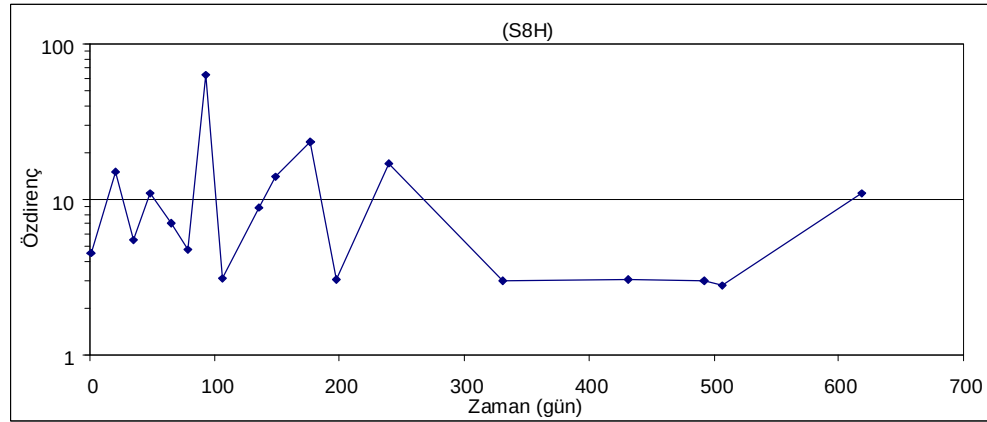
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,030	0,58



(a)



(b)

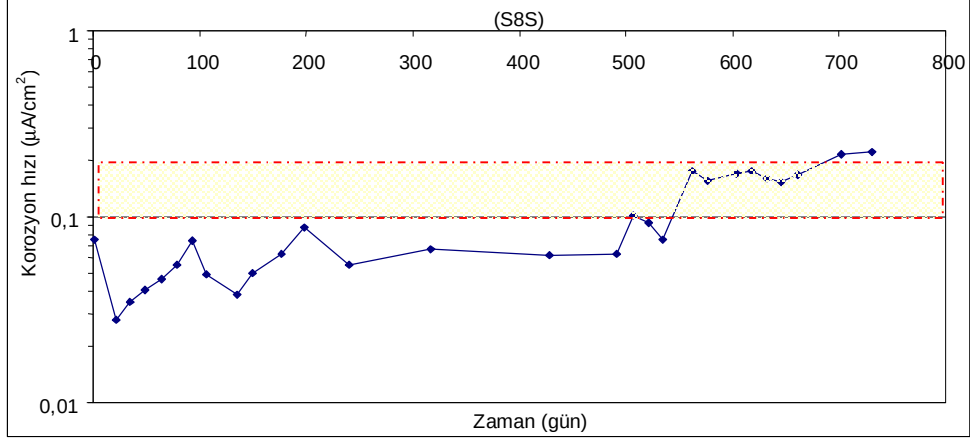


(c)

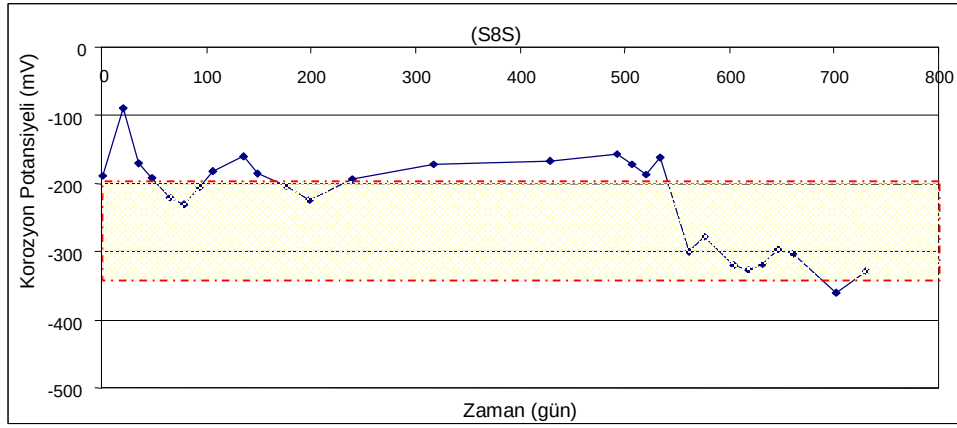
Şekil A.15 : Havada tutulan S8 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.16 : Suda tutulan S8 numunelerinin bileşim parametreleri

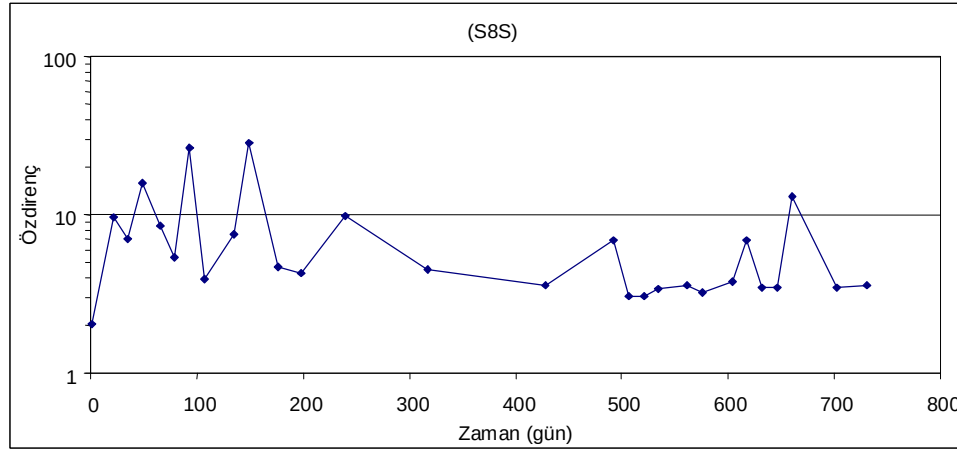
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,030	0,58



(a)



(b)

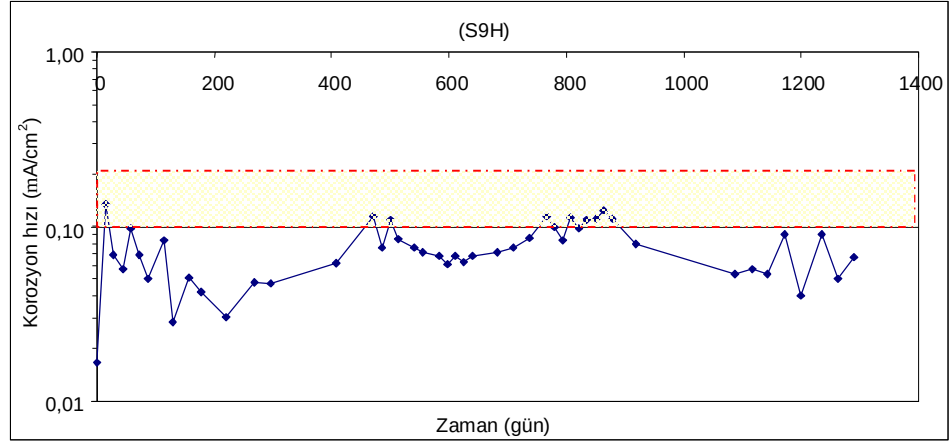


(c)

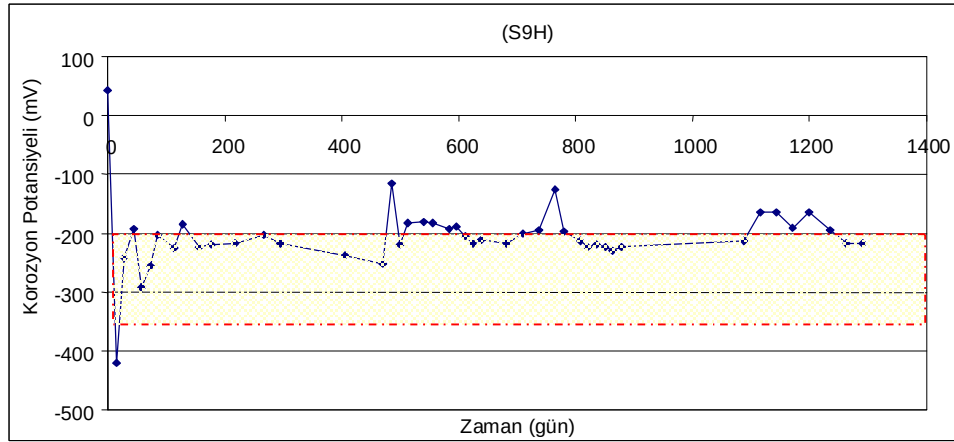
Şekil A.16 : Suda tutulan S8 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.17 : Havada tutulan S9 numunelerinin bileşim parametreleri

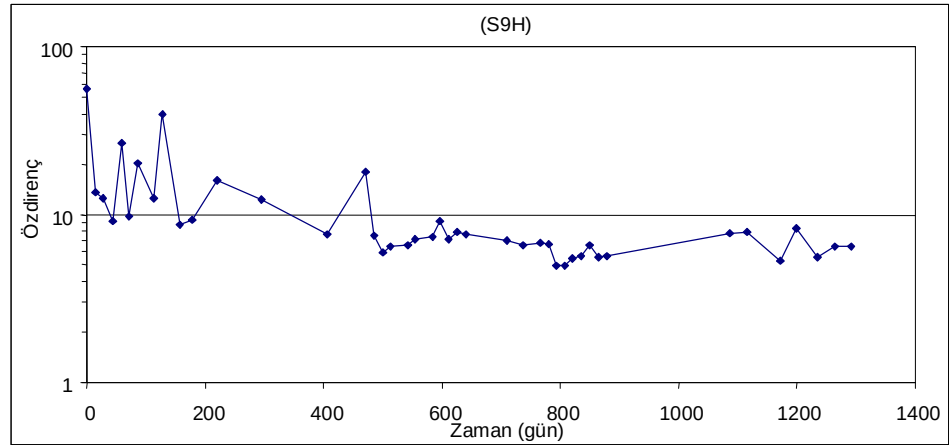
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,120	0,58



(a)



(b)

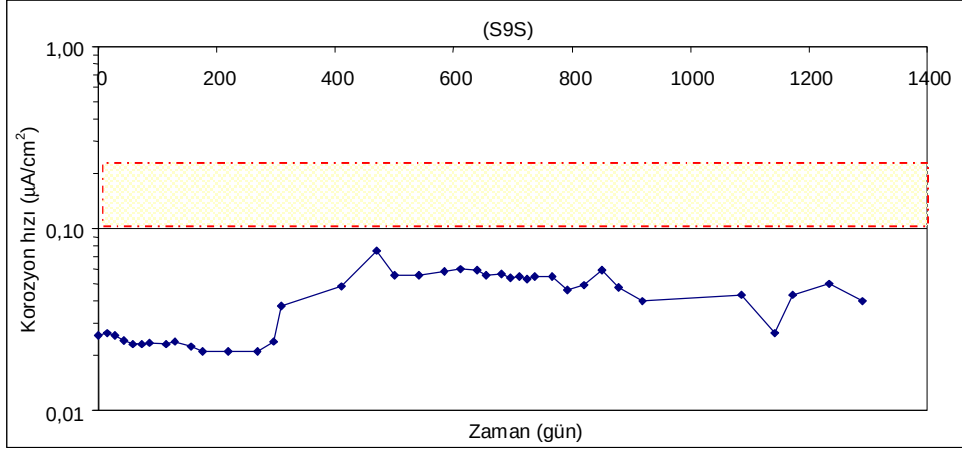


(c)

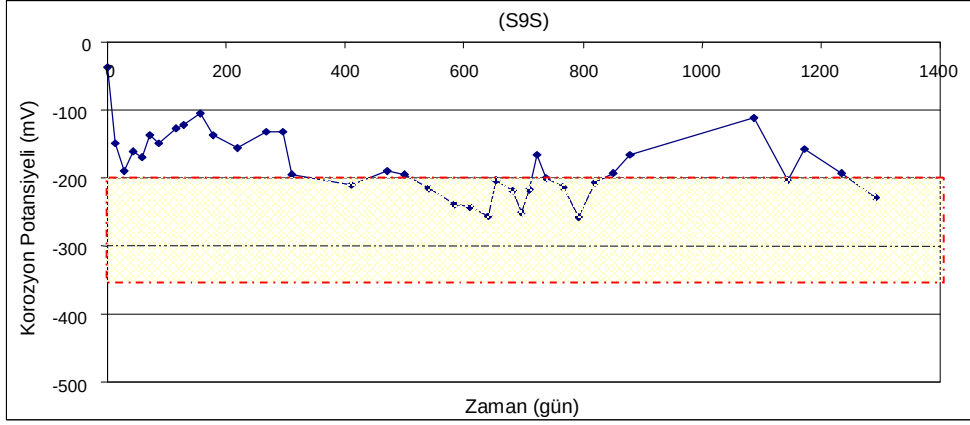
Şekil A.17 : Havada tutulan S9 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.18 : Suda tutulan S9 numunelerinin bileşim parametreleri

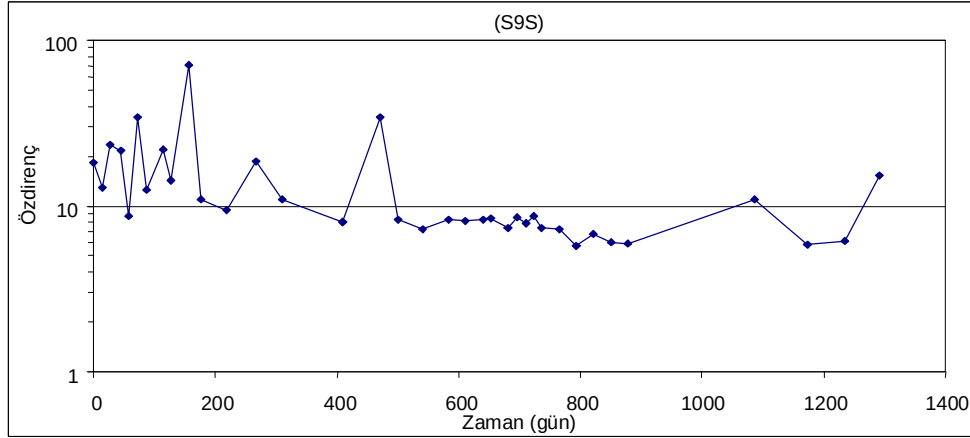
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,120	0,58



(a)



(b)

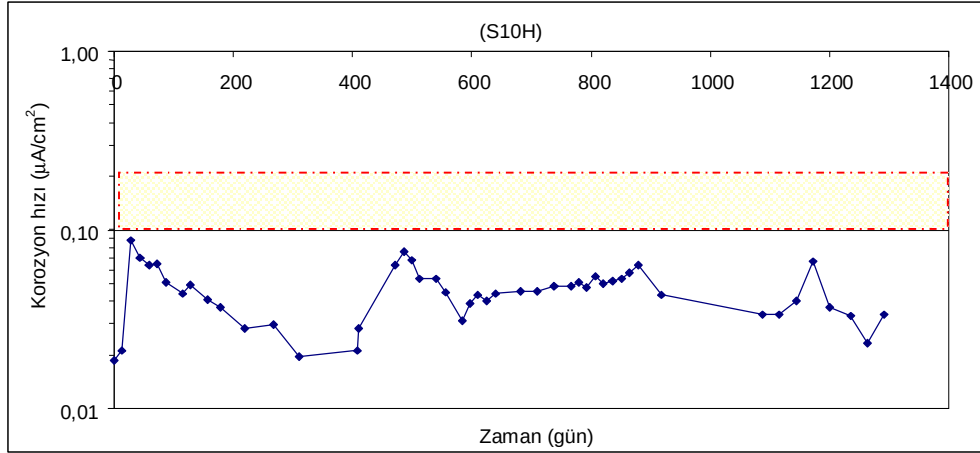


(c)

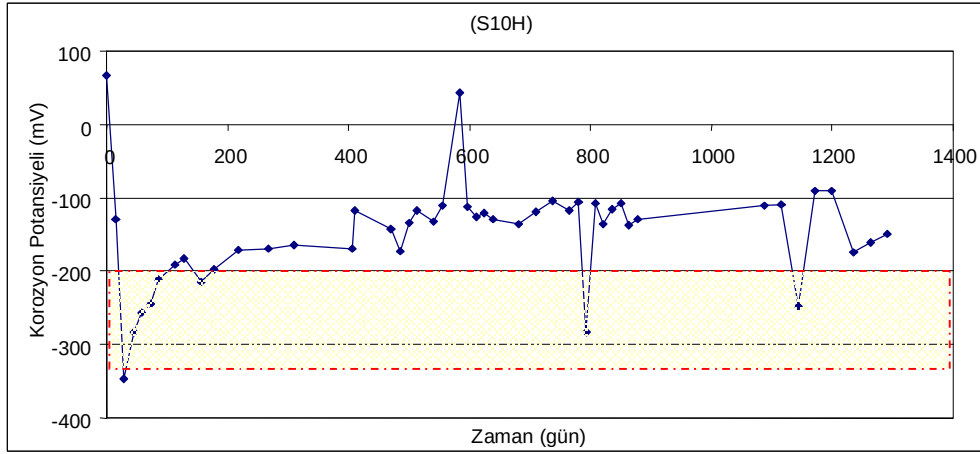
Şekil A.18 : Suda tutulan S9 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.19 : Havada tutulan S10 numunelerinin bileşim parametreleri

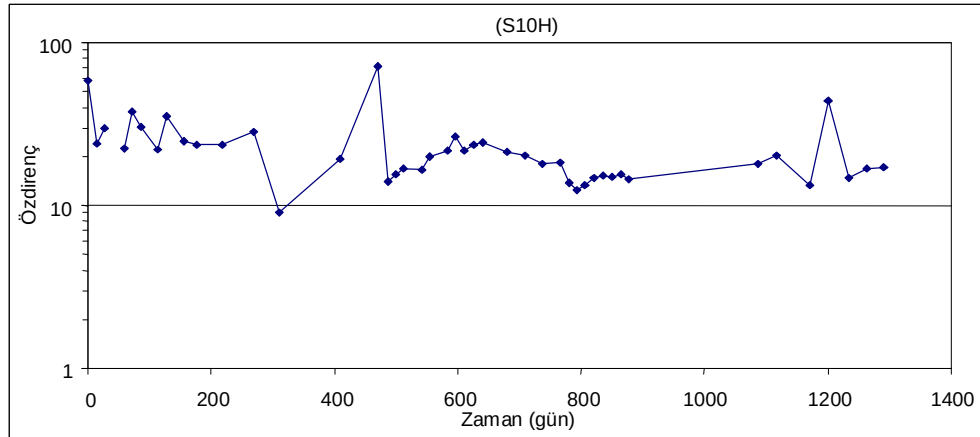
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,120	0,48



(a)



(b)

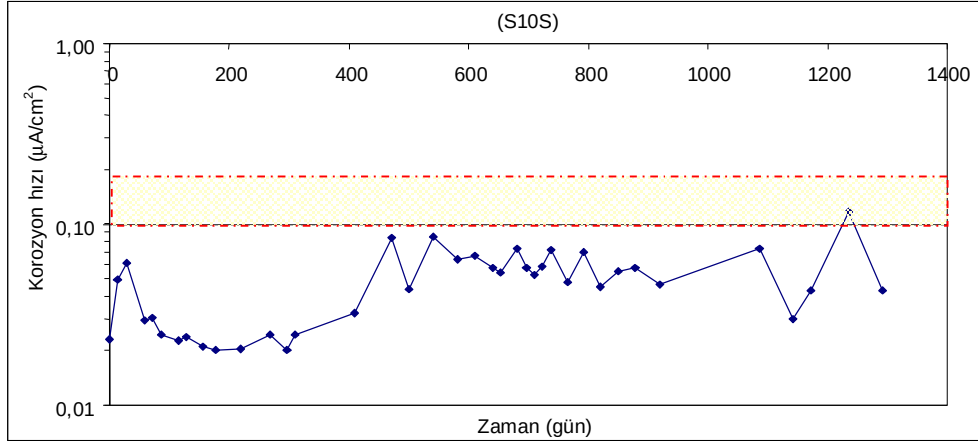


(c)

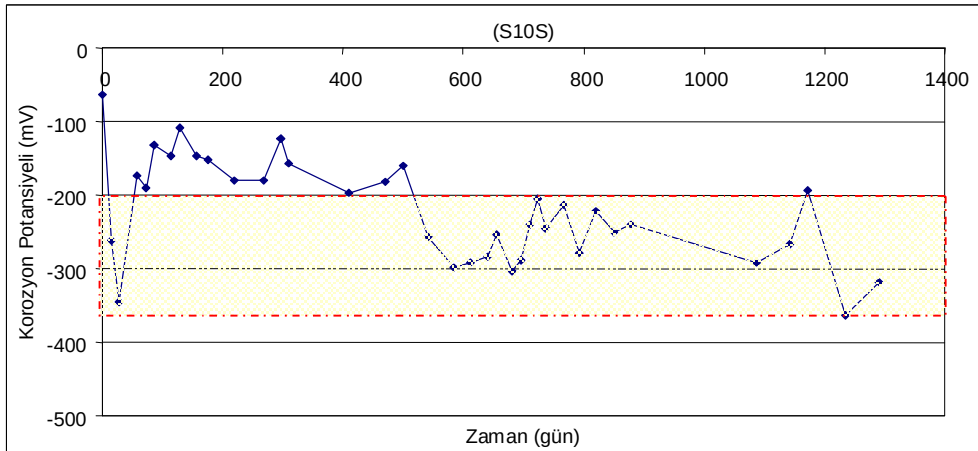
Şekil A.19 : Havada tutulan S10 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.20 : Suda tutulan S10 numunelerinin bileşim parametreleri

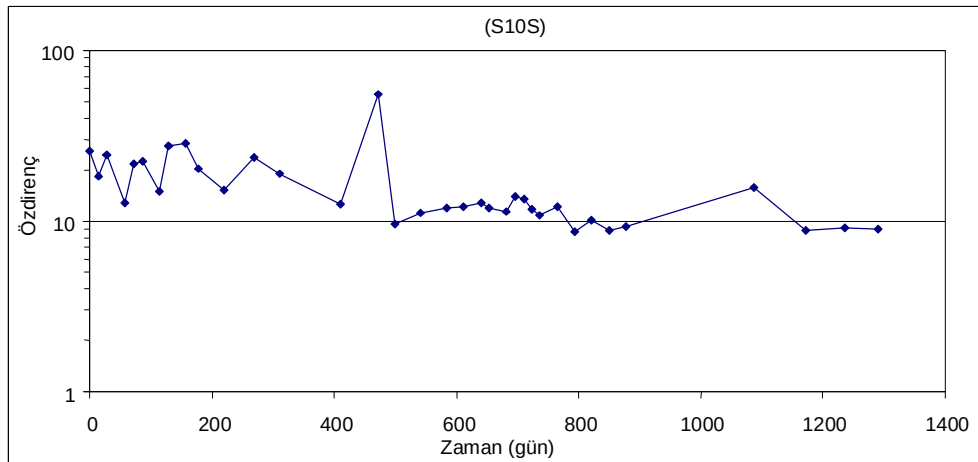
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,120	0,48



(a)



(b)

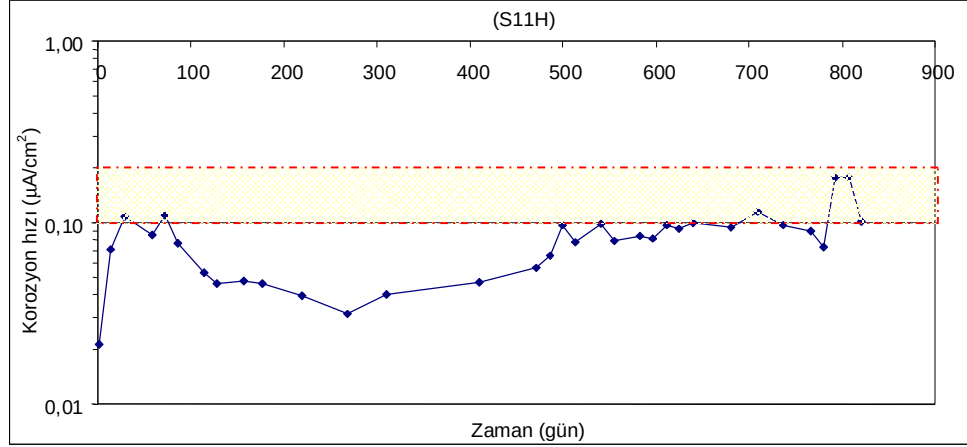


(c)

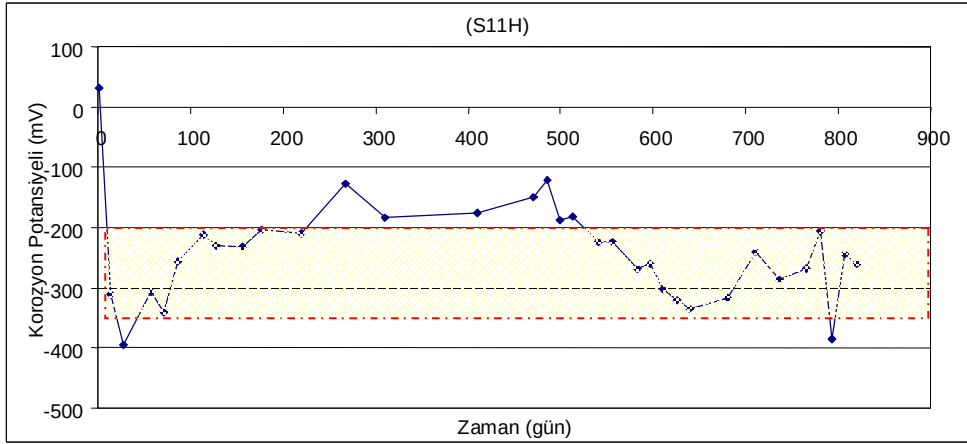
Şekil A.20 : Suda tutulan S10 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.21 : Havada tutulan S11 numunelerinin bileşim parametreleri

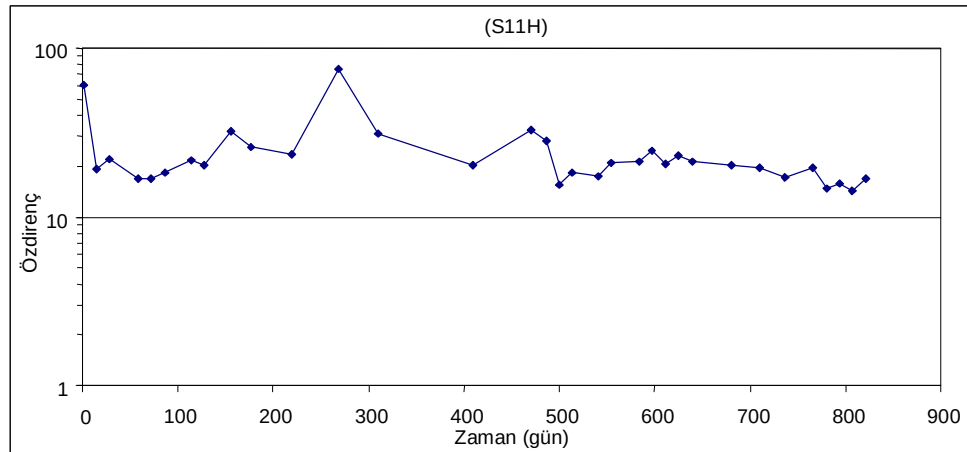
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
265,91	0,075	0,53



(a)



(b)

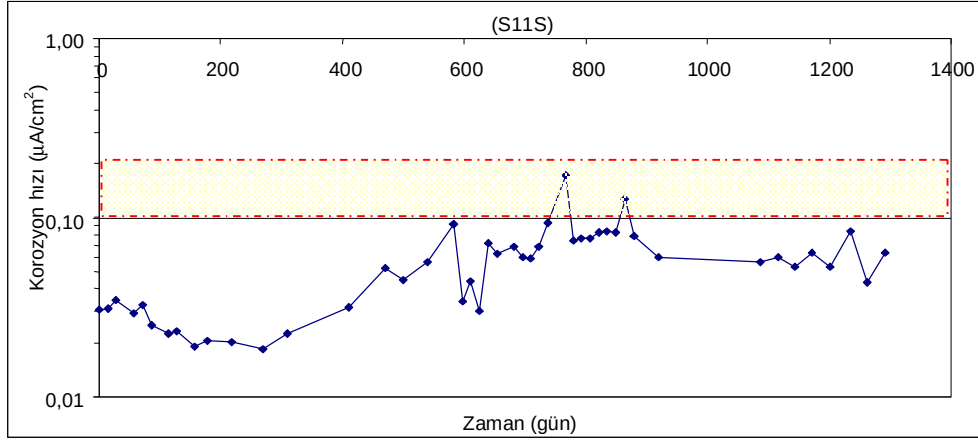


(c)

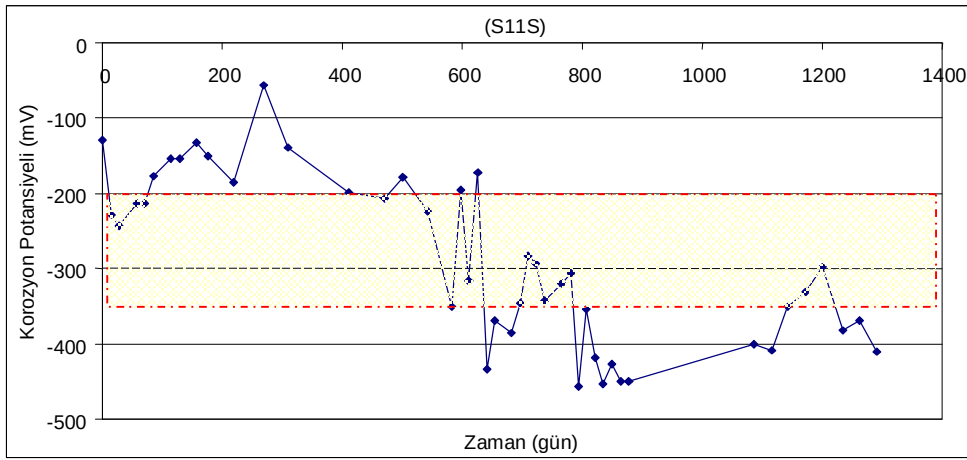
Şekil A.21 : Havada tutulan S11 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.22 : Suda tutulan S11 numunelerinin bileşim parametreleri

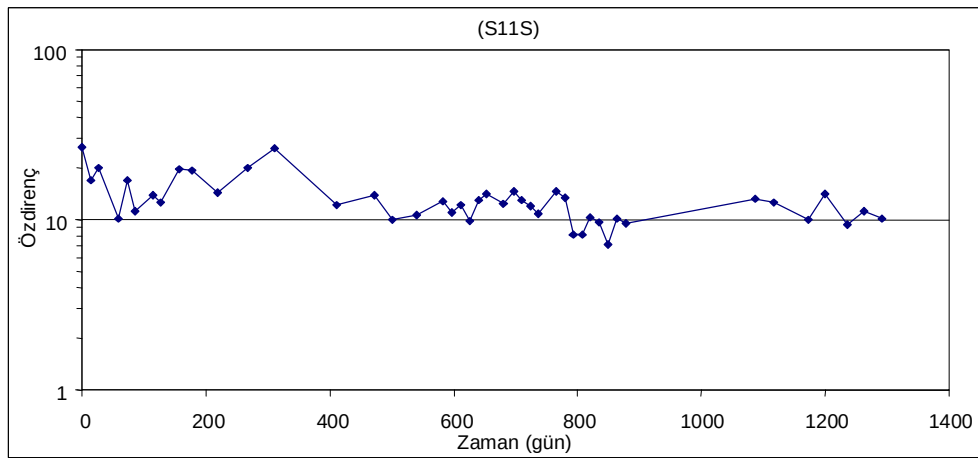
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
265,91	0,075	0,53



(a)



(b)

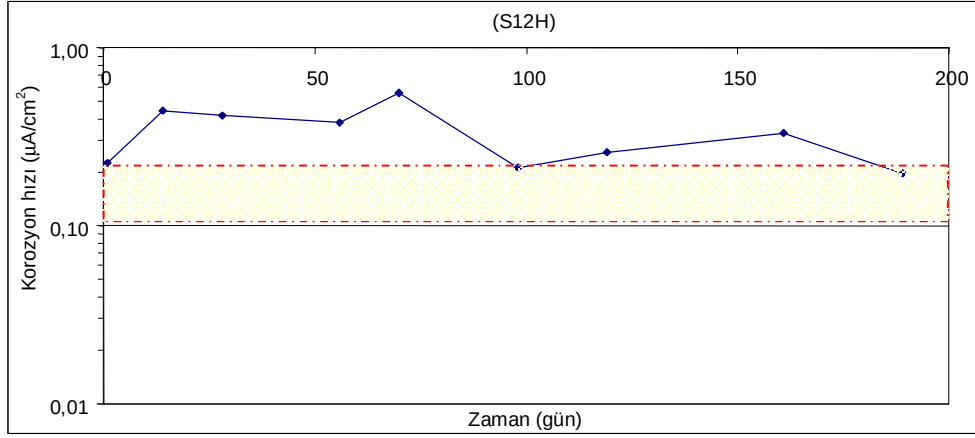


(c)

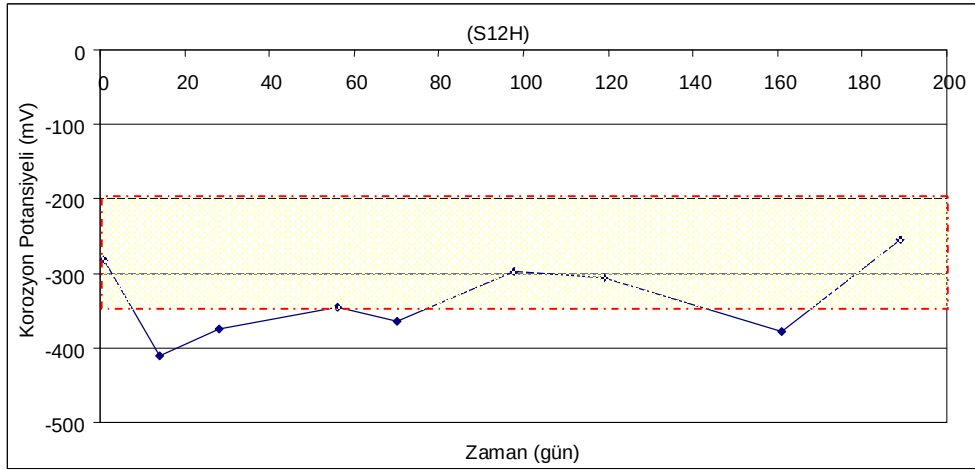
Şekil A.22 : Suda tutulan S11 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.23 : Havada tutulan S12 numunelerinin bileşim parametreleri

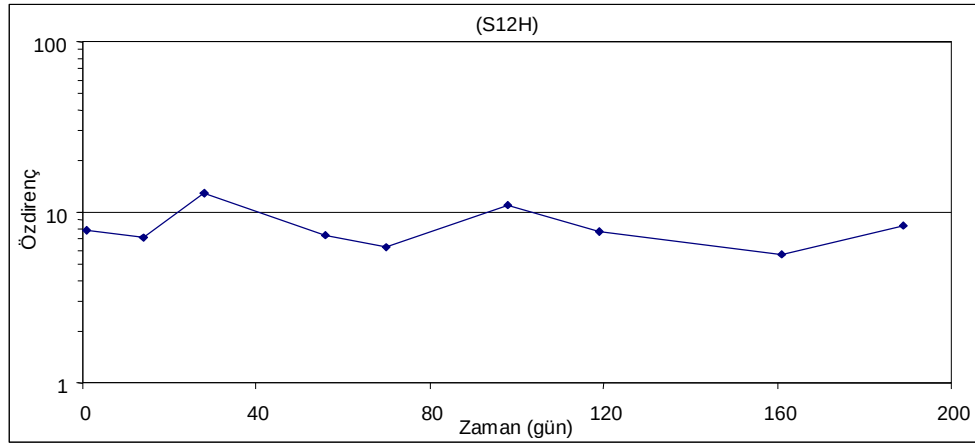
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,030	0,58



(a)



(b)

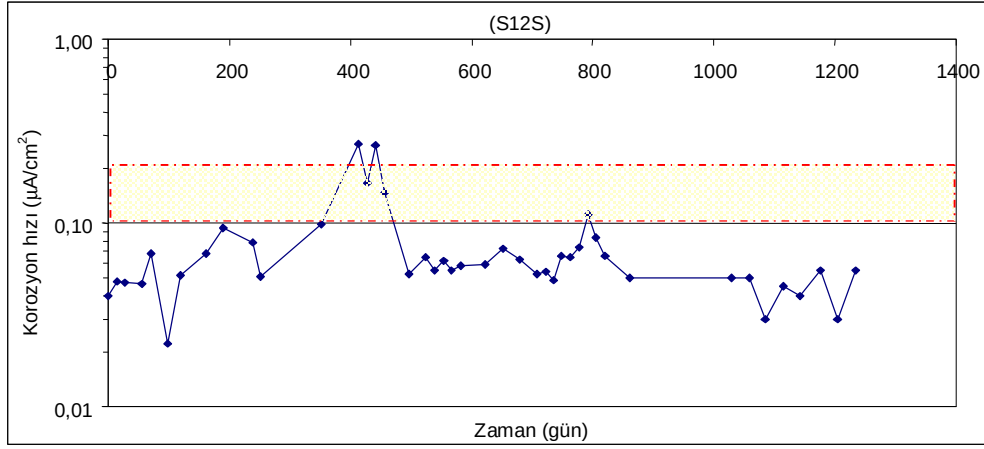


(c)

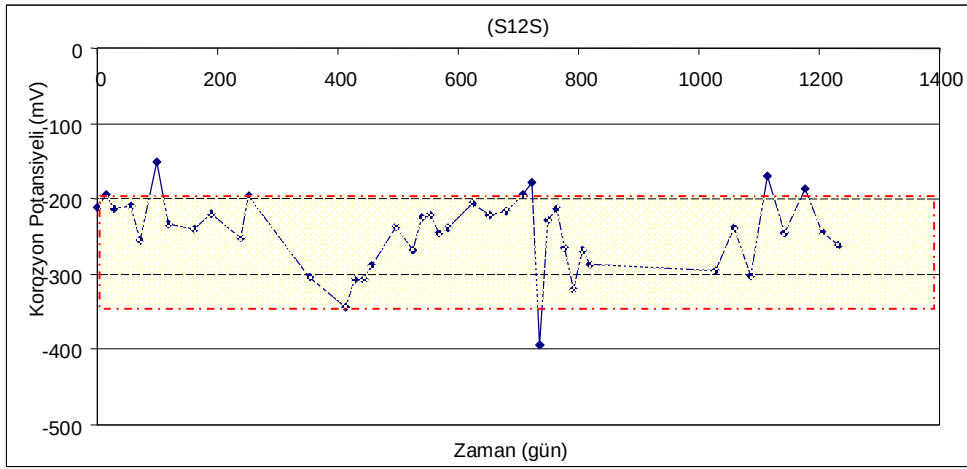
Şekil A.23 : Havada tutulan S12 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.24 : Suda tutulan S12 numunelerinin bileşim parametreleri

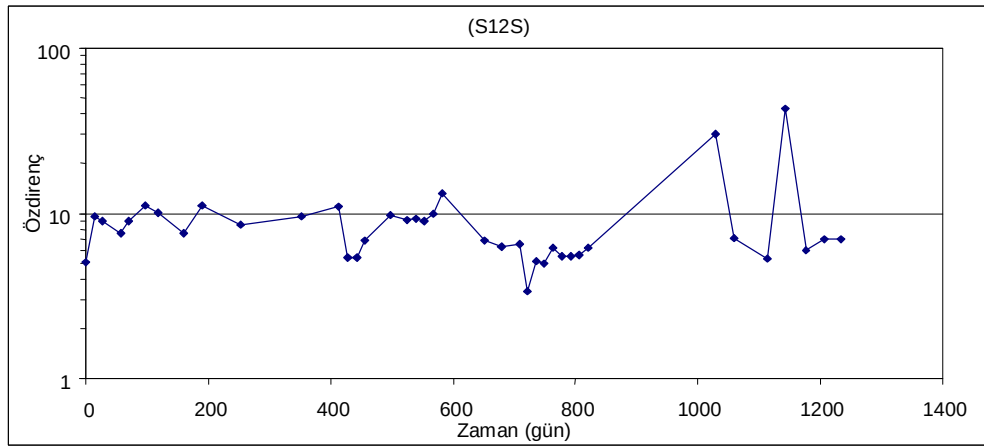
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,030	0,58



(a)



(b)

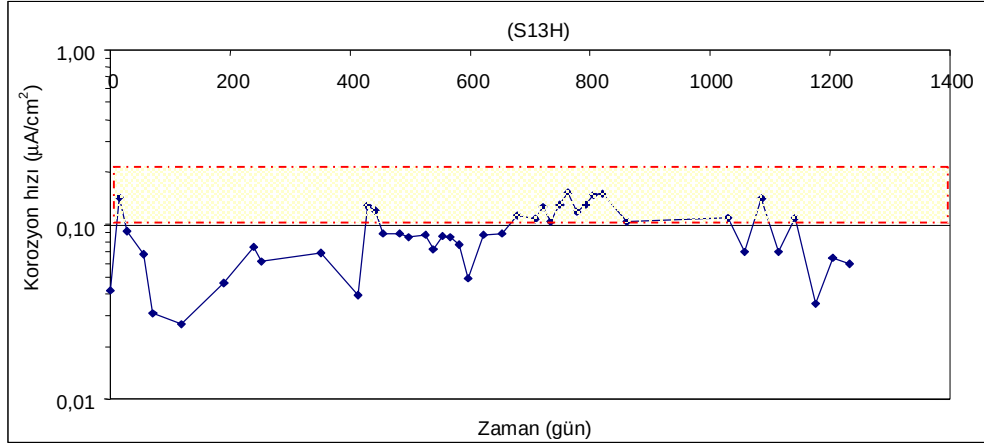


(c)

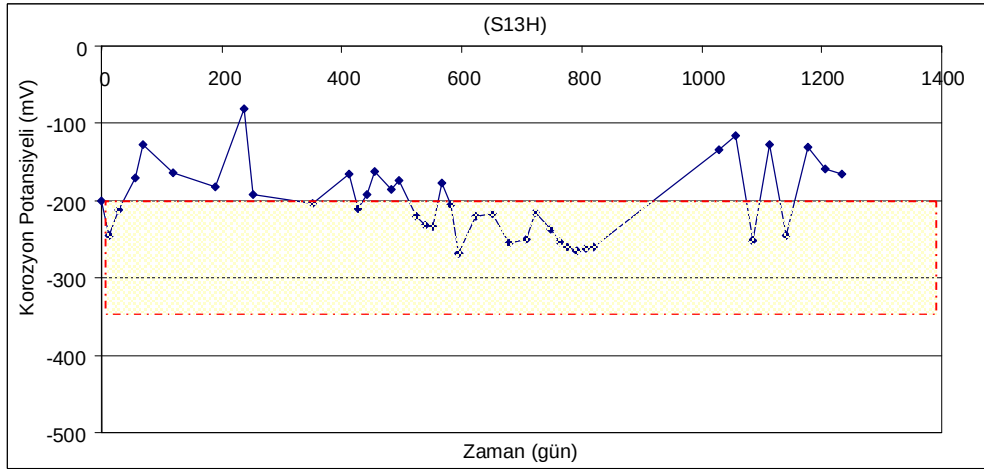
Şekil A.24 : Suda tutulan S12 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.25 : Havada tutulan S13 numunelerinin bileşim parametreleri

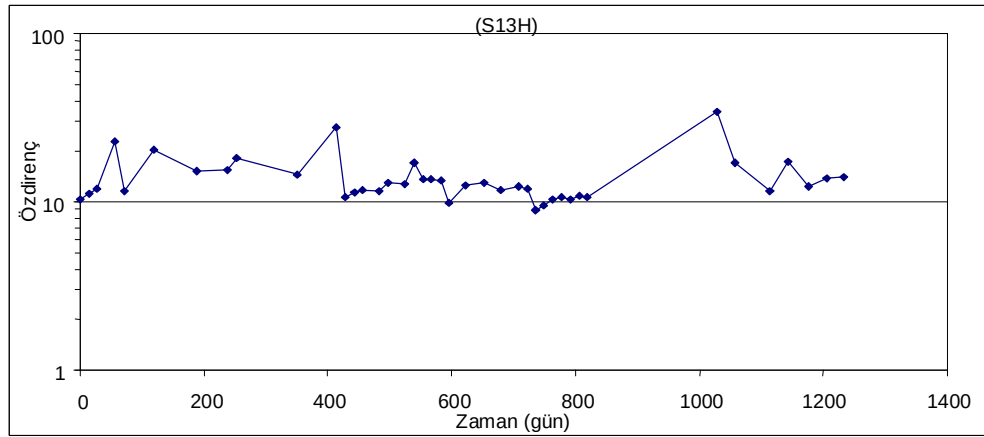
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,030	0,48



(a)



(b)

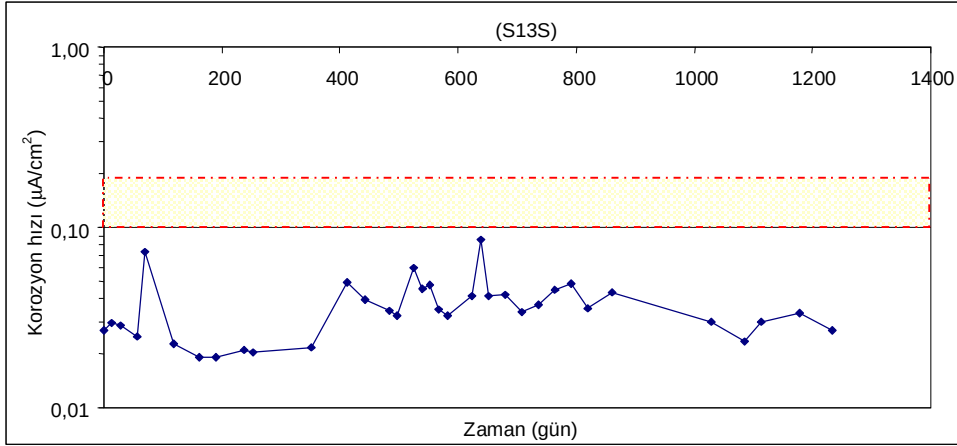


(c)

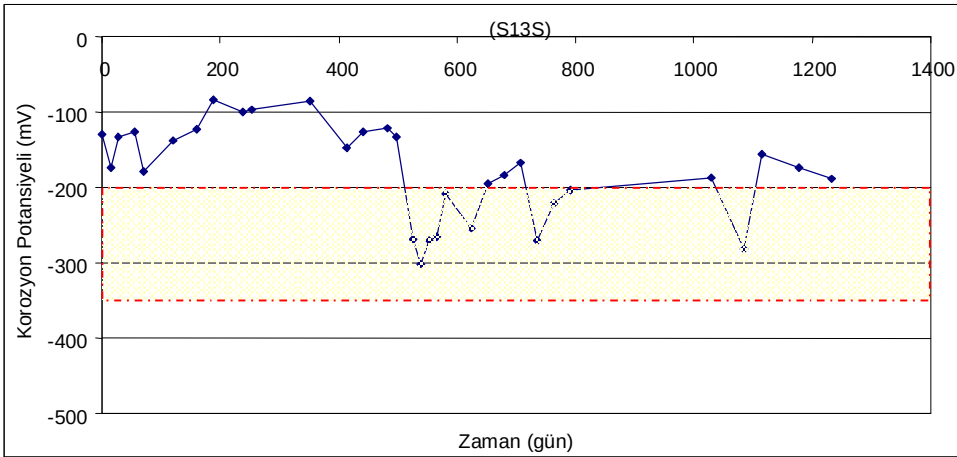
Şekil A.25 : Havada tutulan S12 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.26 : Suda tutulan S13 numunelerinin bileşim parametreleri

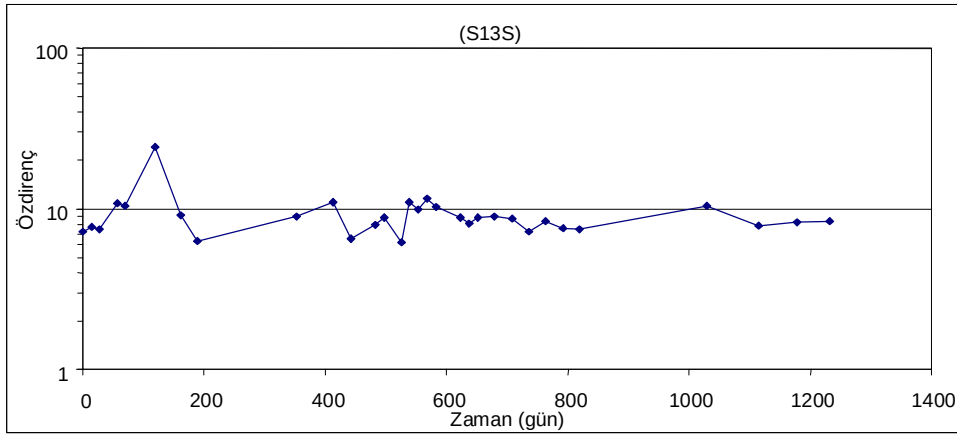
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,030	0,48



(a)



(b)

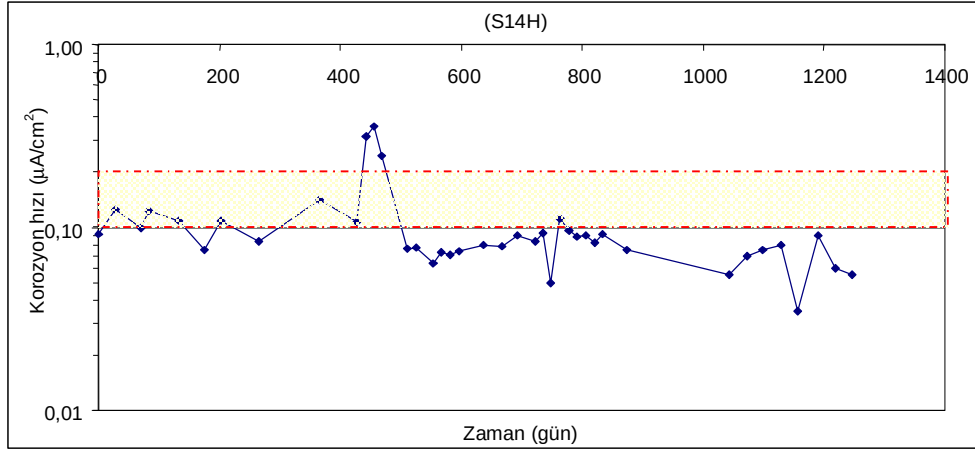


(c)

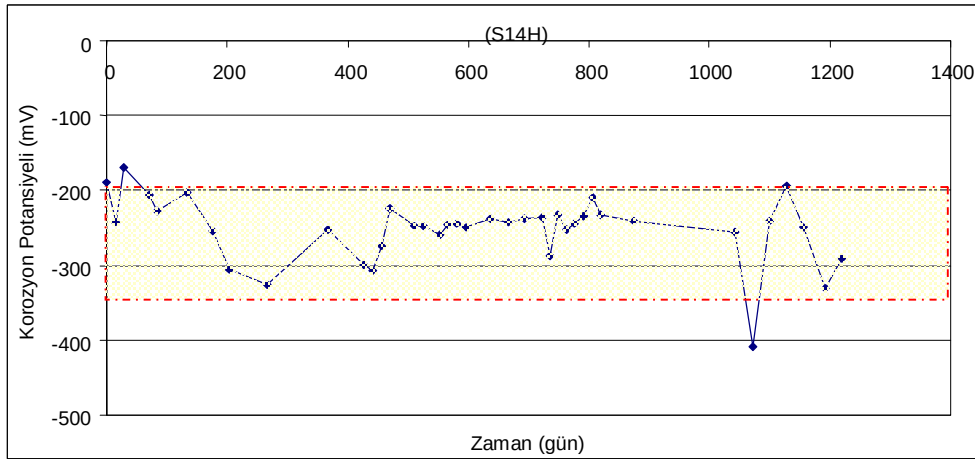
Şekil A.26 : Suda tutulan S13 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.27 : Havada tutulan S14 numunelerinin bileşim parametreleri

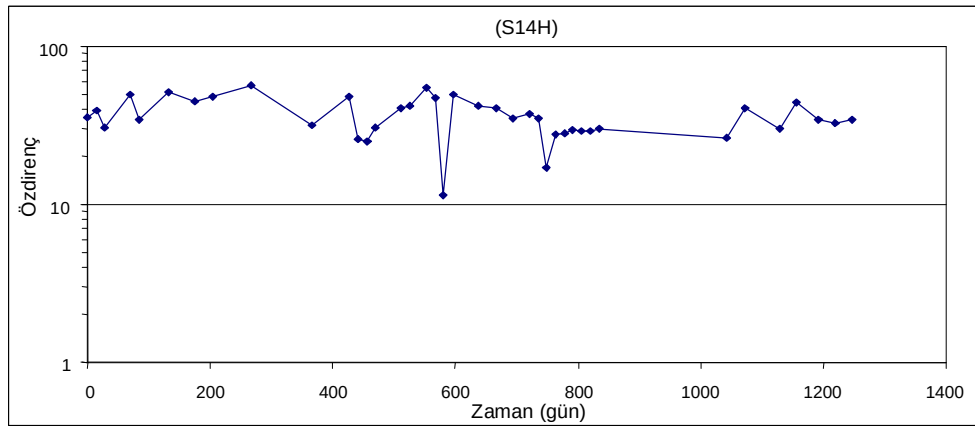
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,120	0,48



(a)



(b)

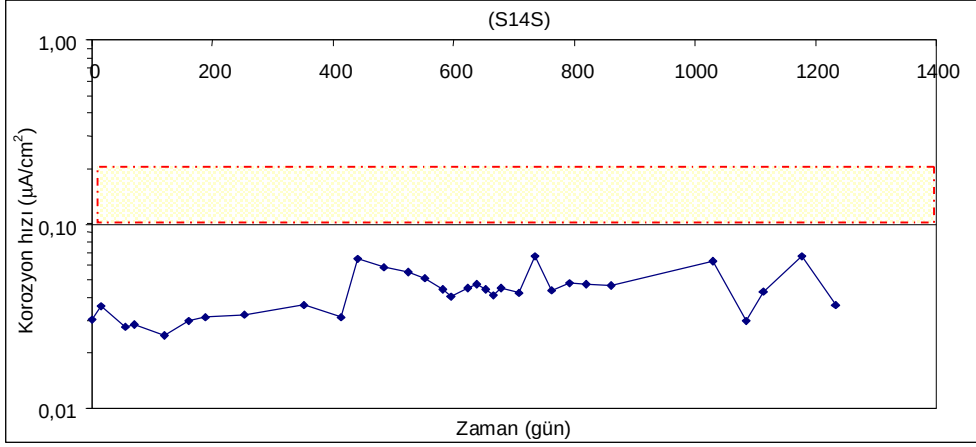


(c)

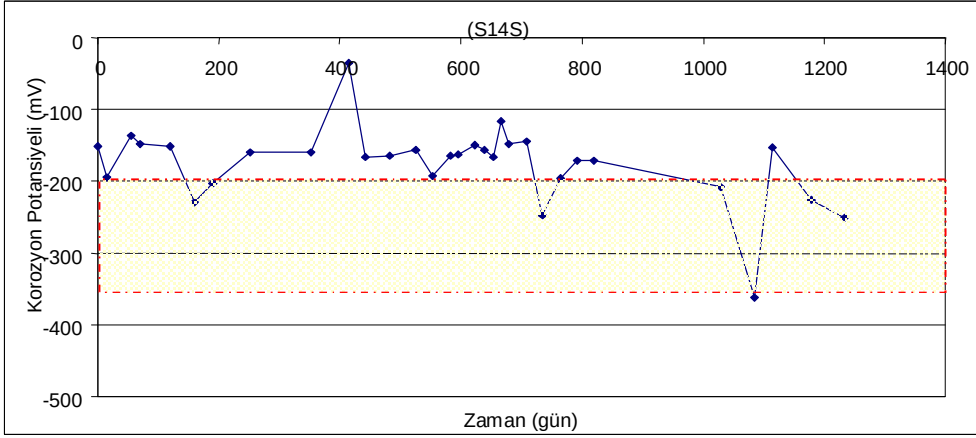
Şekil A.27 : Havada tutulan S14 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.28 : Suda tutulan S14 numunelerinin bileşim parametreleri

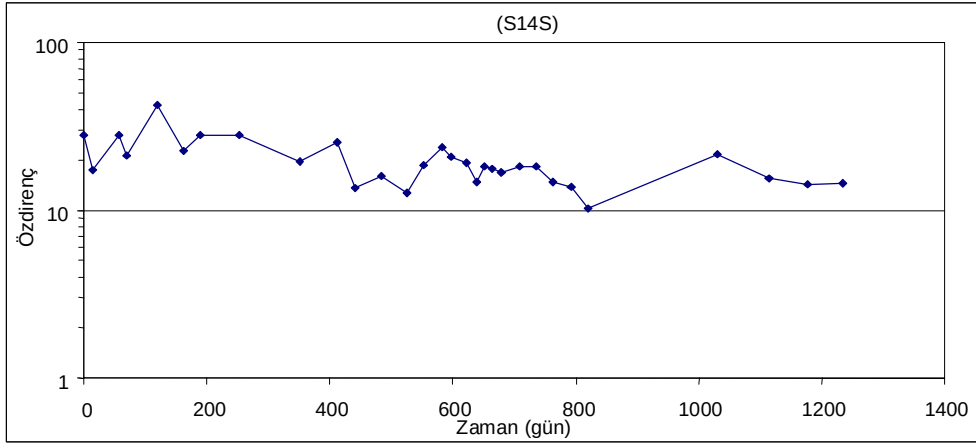
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
300,00	0,120	0,48



(a)



(b)

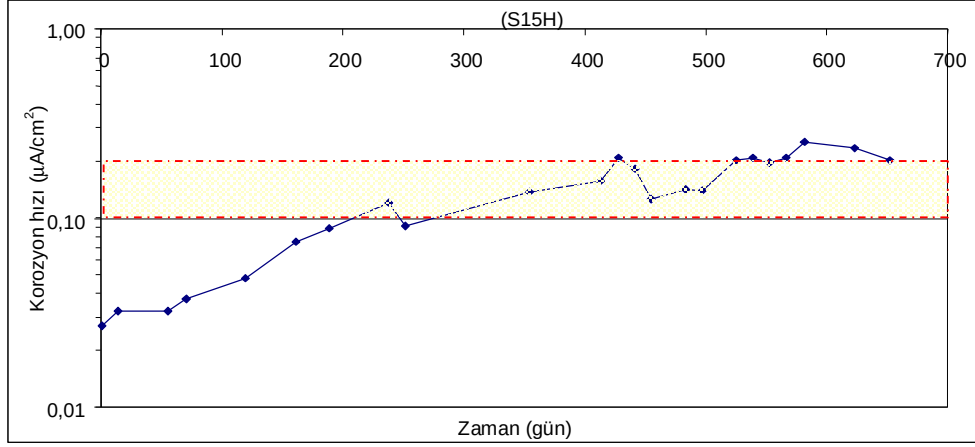


(c)

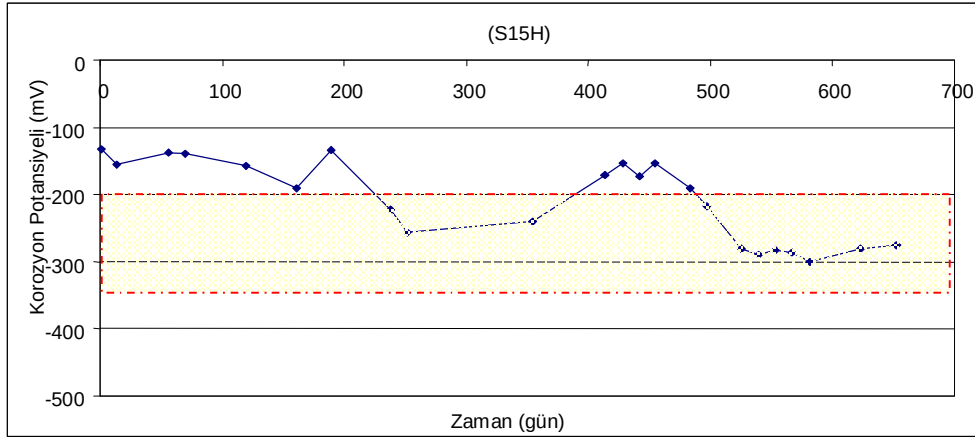
Şekil A.28 : Suda tutulan S14 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.29 : Havada tutulan S15 numunelerinin bileşim parametreleri

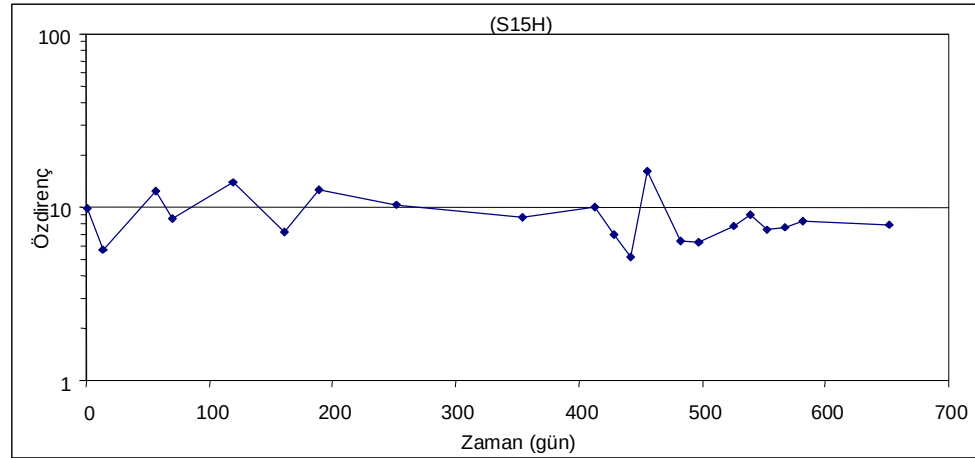
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,030	0,48



(a)



(b)

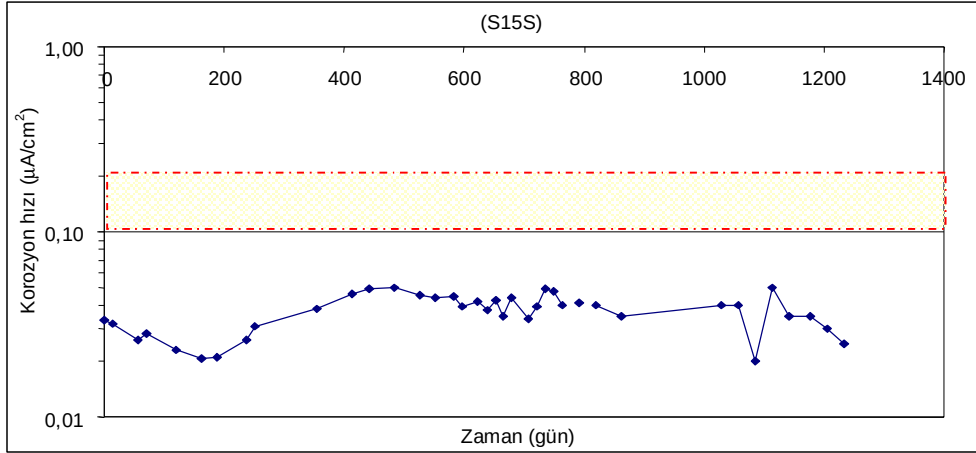


(c)

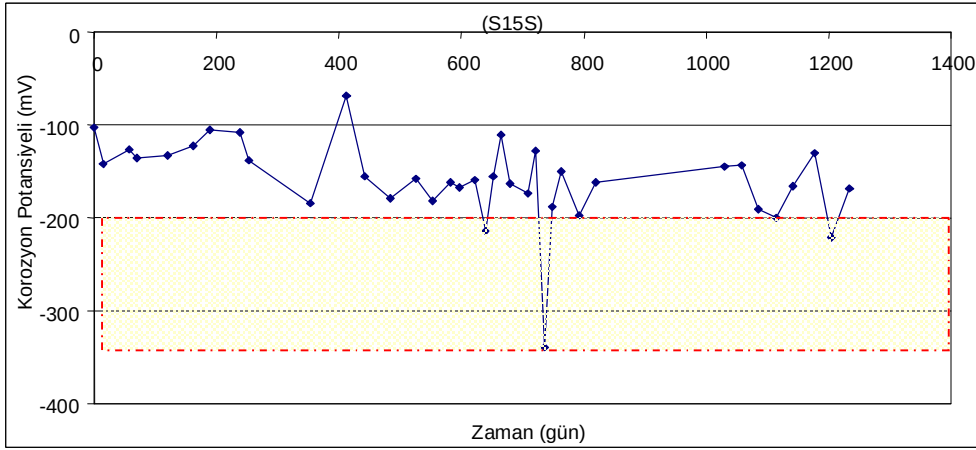
Şekil A.29 : Havada tutulan S15 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.30 : Suda tutulan S15 numunelerinin bileşim parametreleri

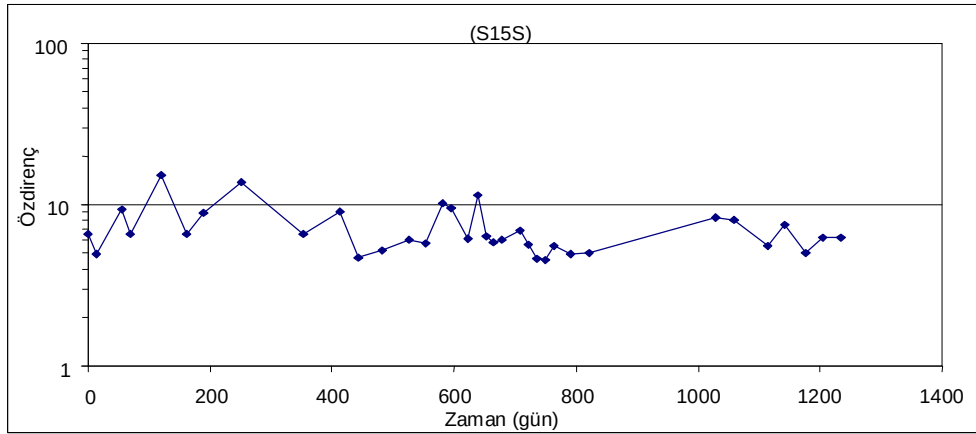
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
400,00	0,030	0,48



(a)



(b)

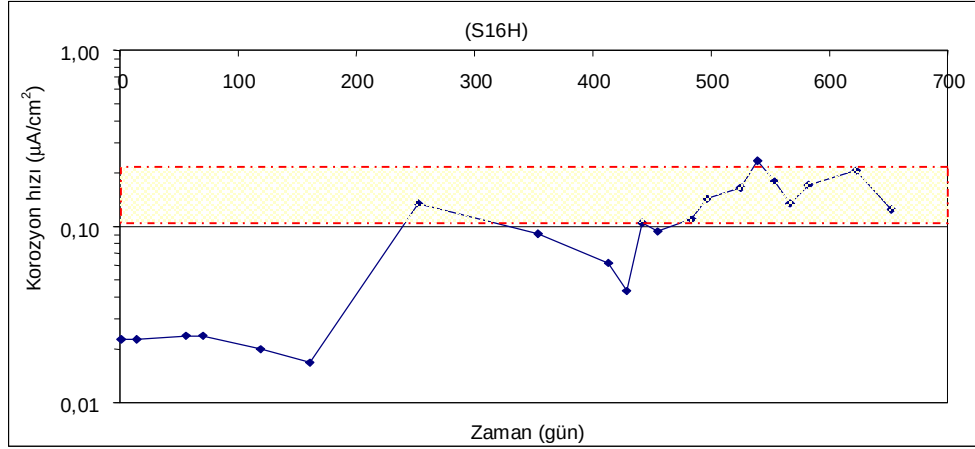


(c)

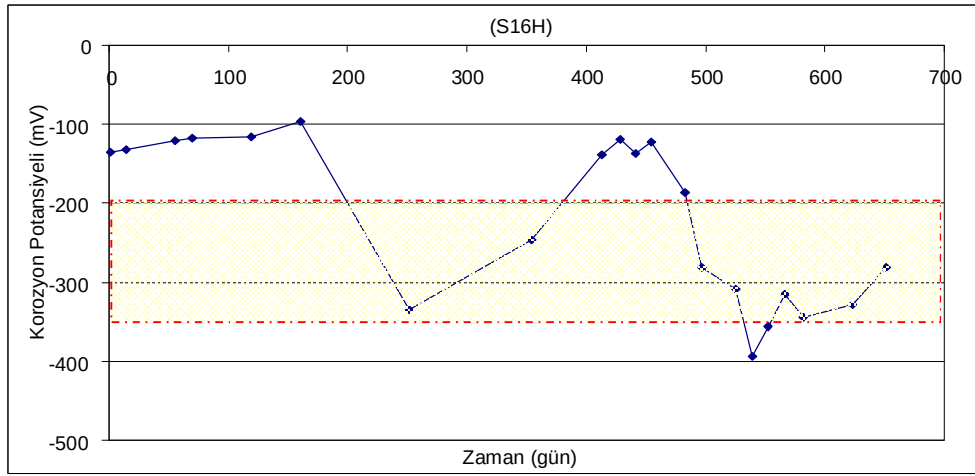
Şekil A.30 : Suda tutulan S15 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.31 : Havada tutulan S16 numunelerinin bileşim parametreleri

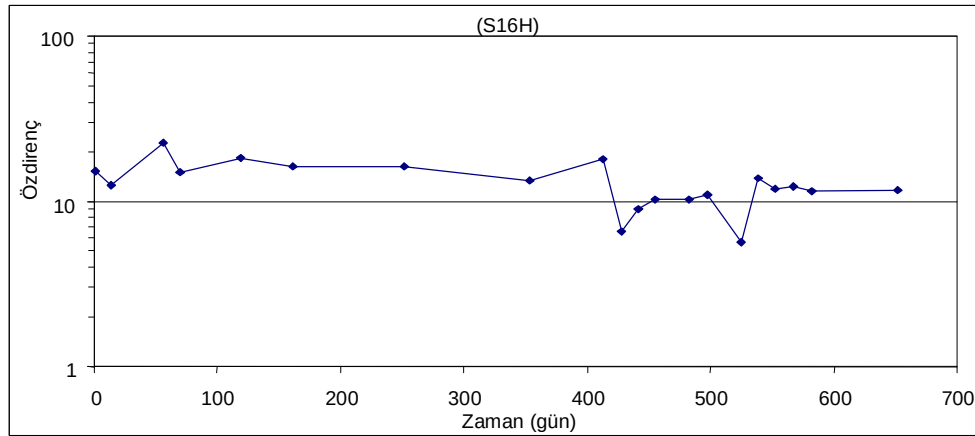
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

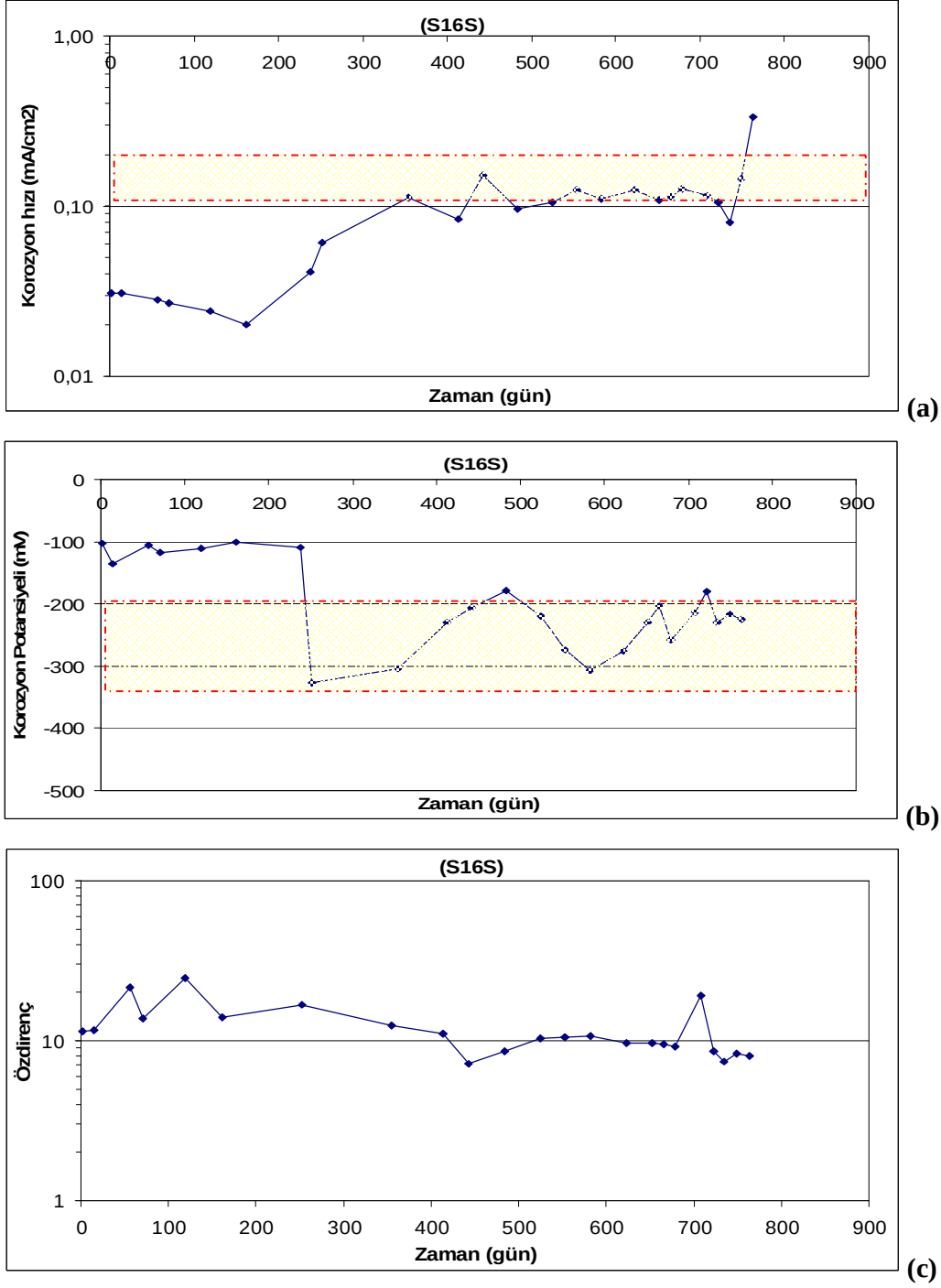


(c)

Şekil A.31 : Havada tutulan S16 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.32 : Suda tutulan S16 numunelerinin bileşim parametreleri

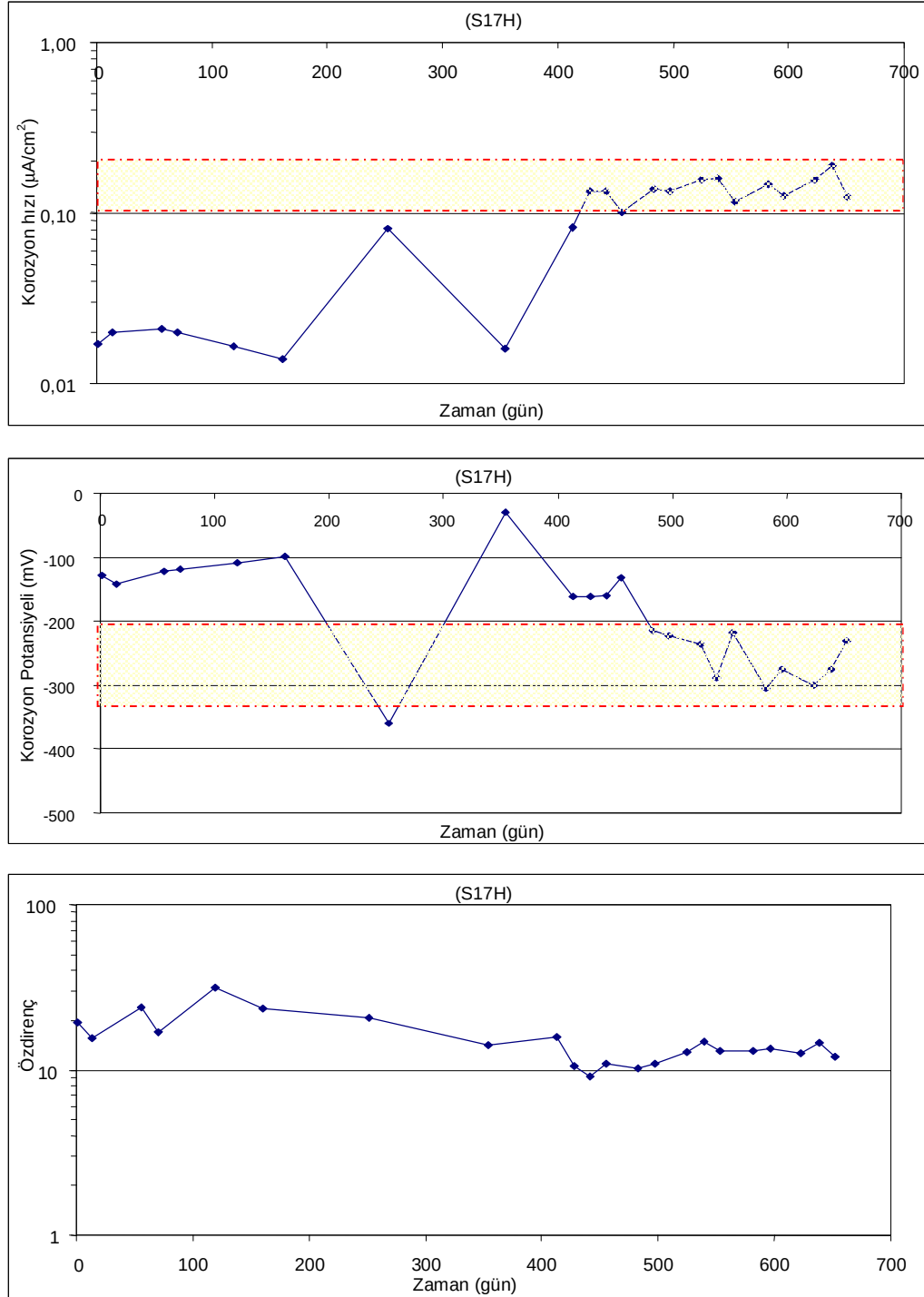
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



Şekil A.32 : Suda tutulan S16 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.33 : Havada tutulan S17 numunelerinin bileşim parametreleri

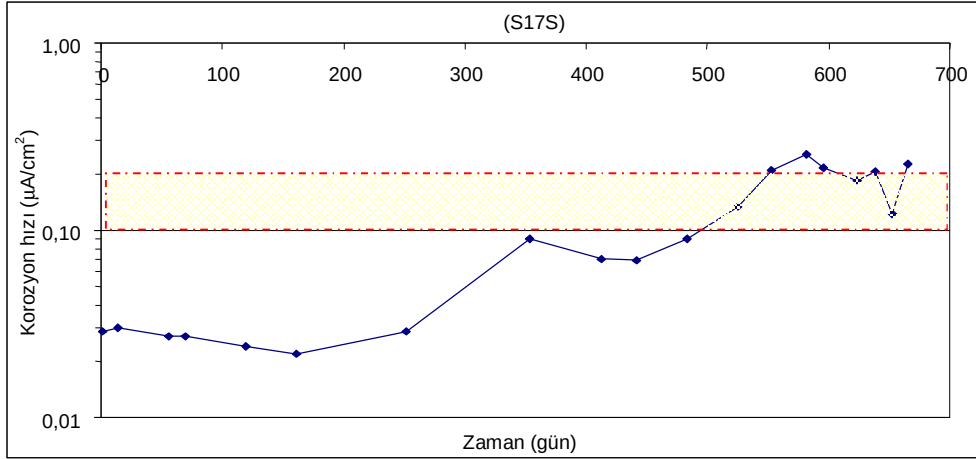
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



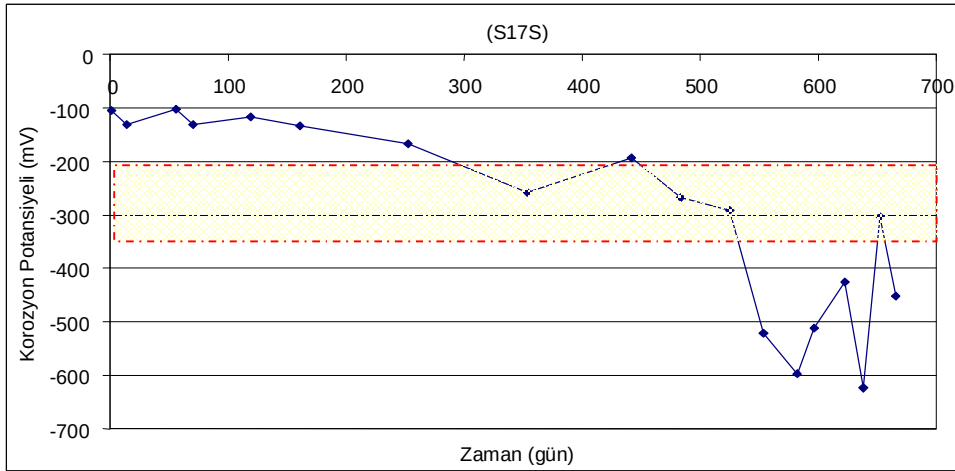
Şekil A.33 : Havada tutulan S17 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.34 : Suda tutulan S17 numunelerinin bileşim parametreleri

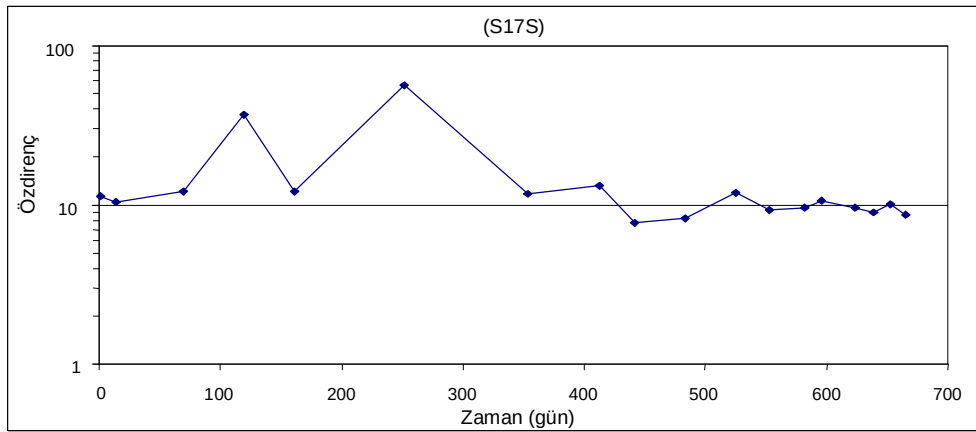
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

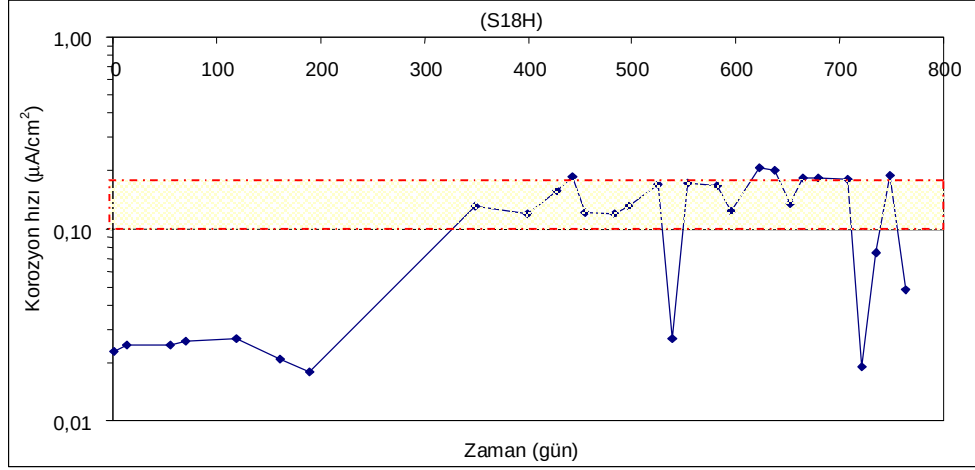


(c)

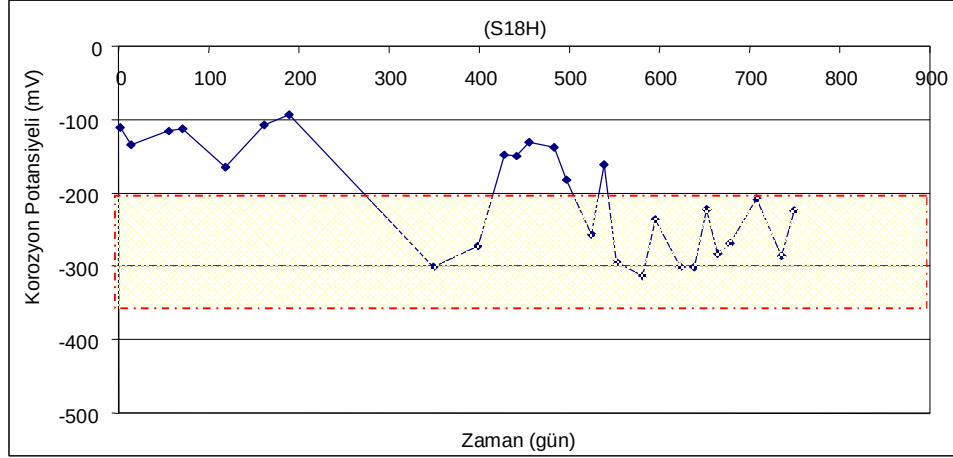
Şekil A.34 : Suda tutulan S17 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.35 : Havada tutulan S18 numunelerinin bileşim parametreleri

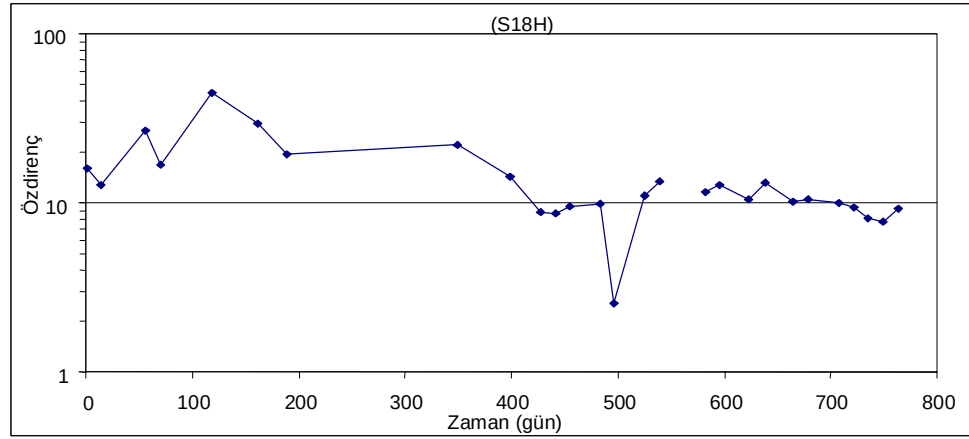
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

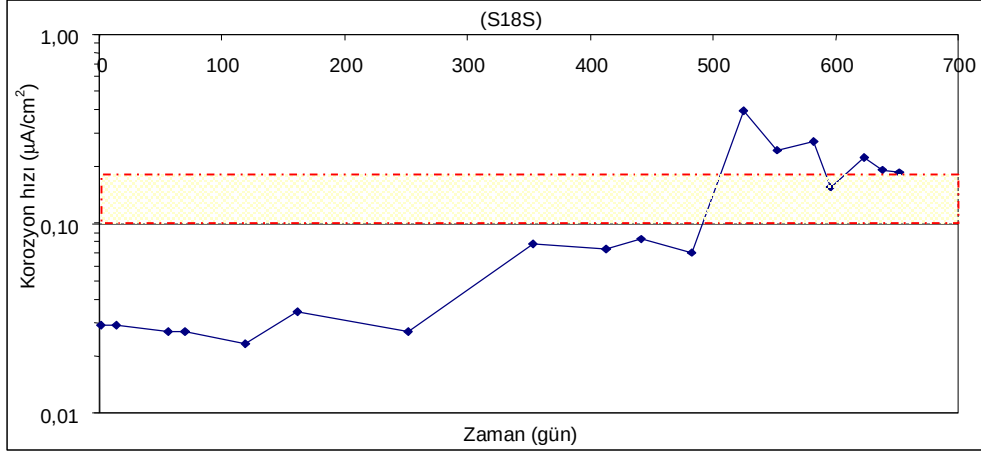


(c)

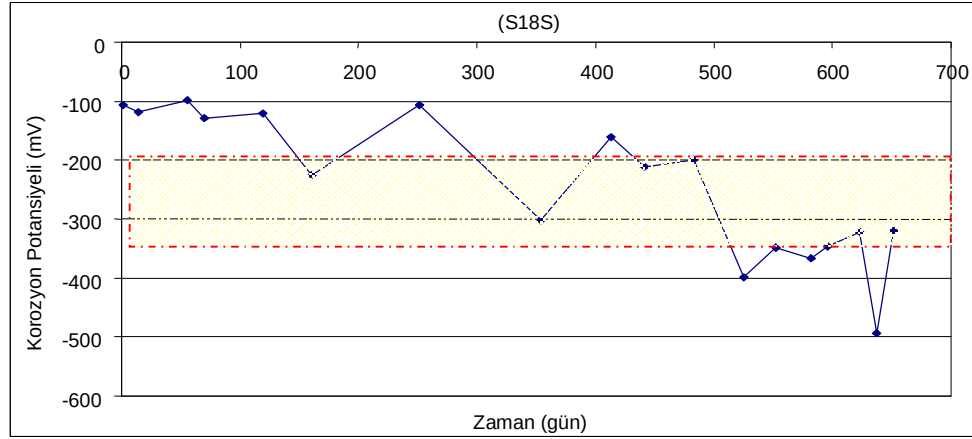
Şekil A.35 : Havada tutulan S18 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.36 : Suda tutulan S18 numunelerinin bileşim parametreleri

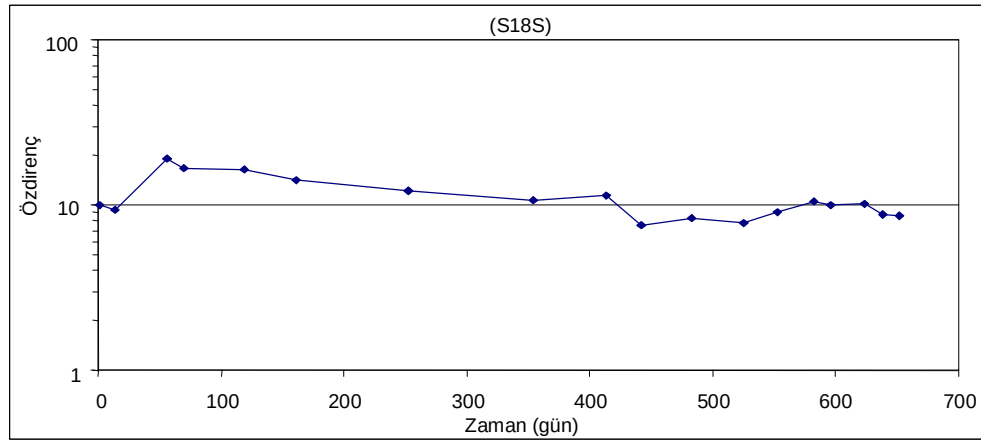
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

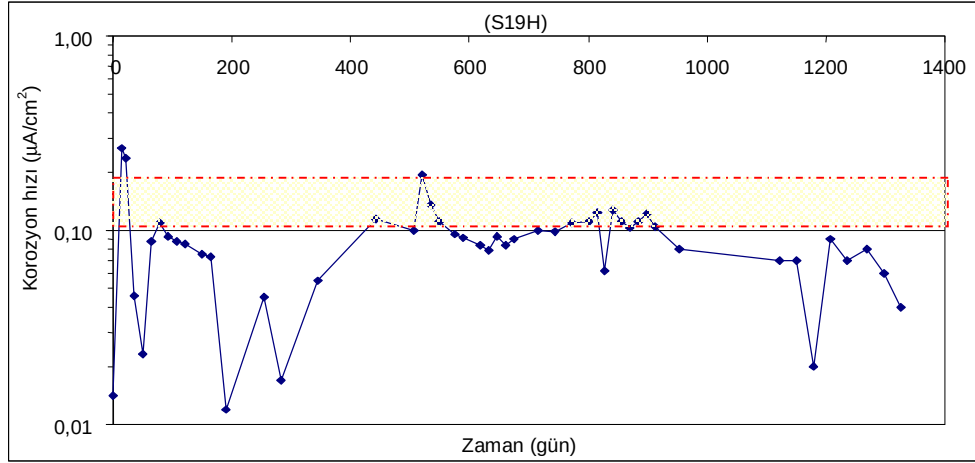


(c)

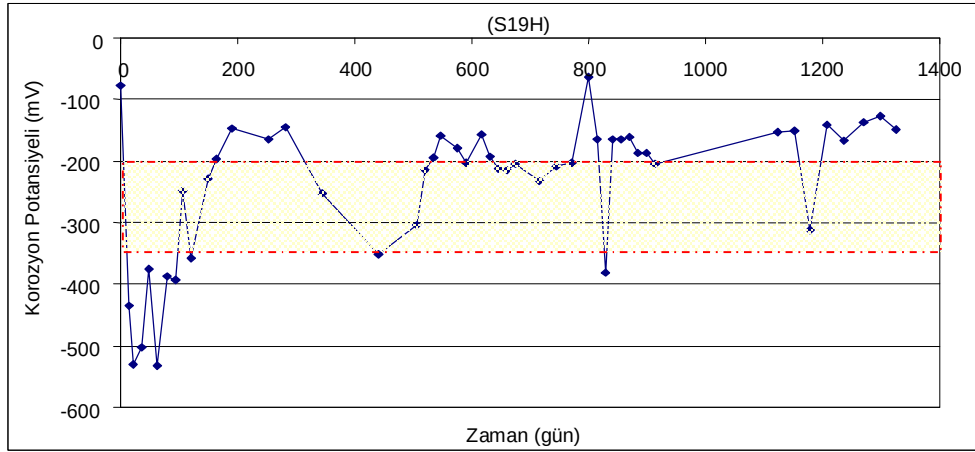
Şekil A.36 : Suda tutulan S18 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.37 : Havada tutulan S19 numunelerinin bileşim parametreleri

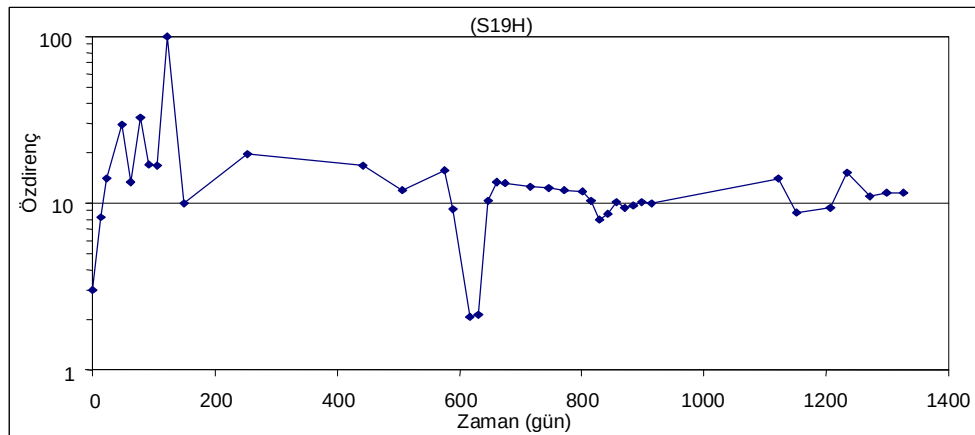
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

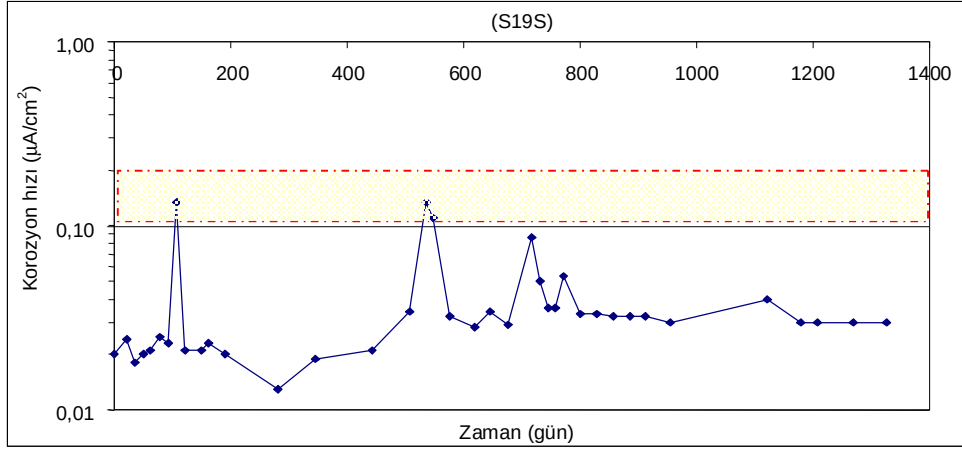


(c)

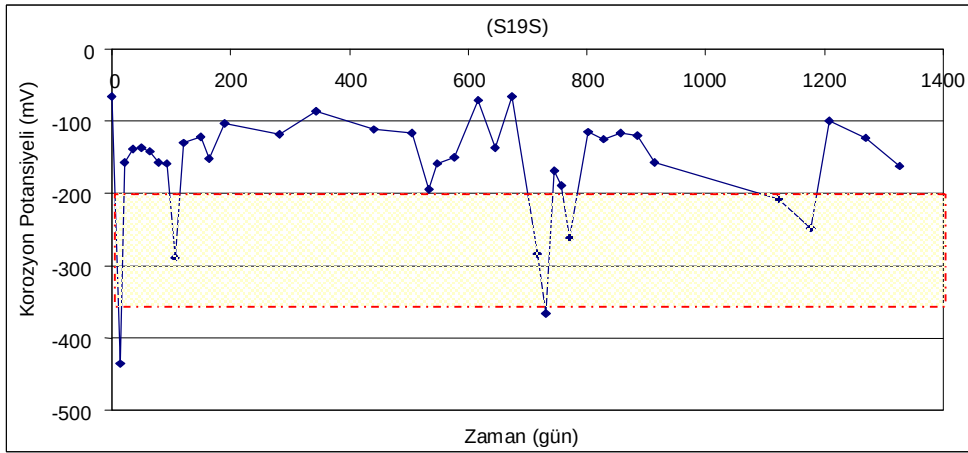
Şekil A.37 : Havada tutulan S19 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.38 : Suda tutulan S19 numunelerinin bileşim parametreleri

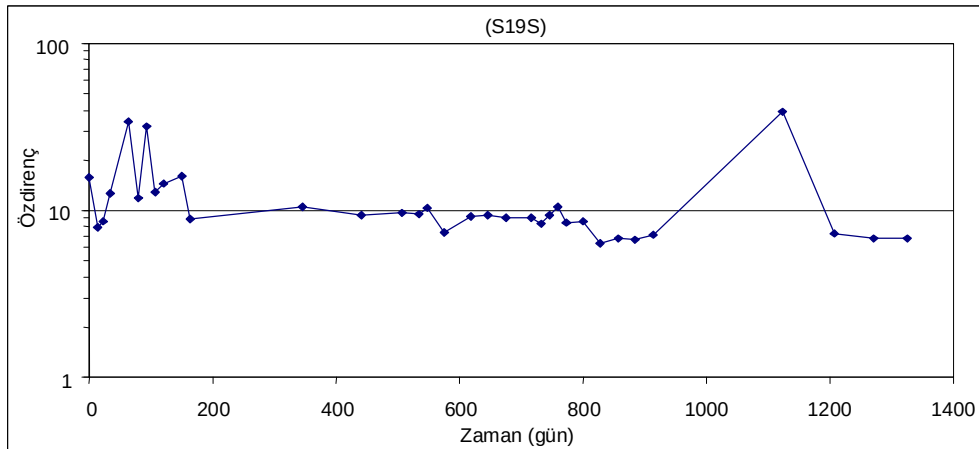
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

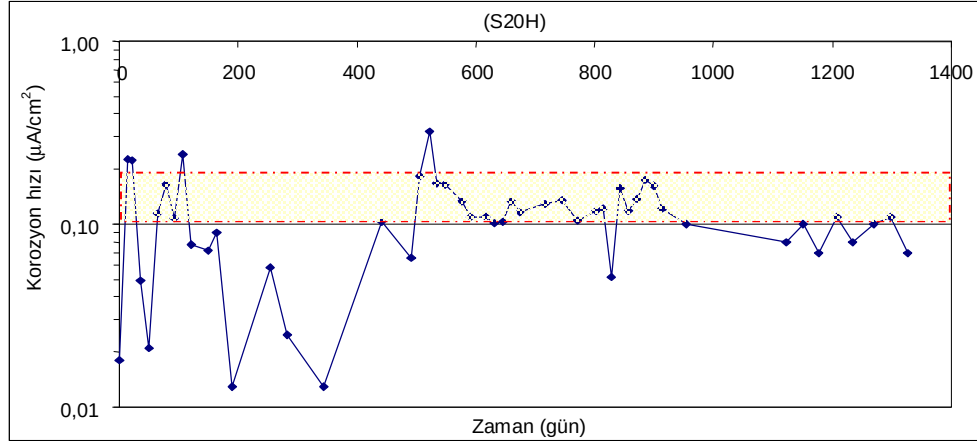


(c)

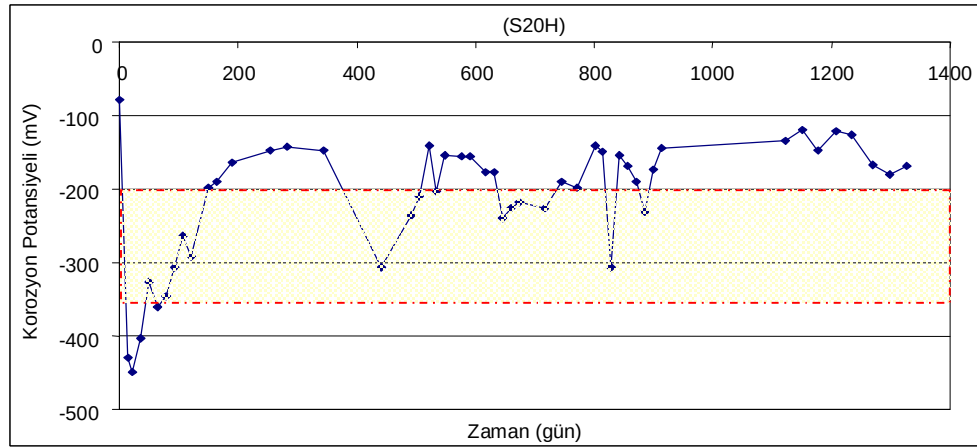
Şekil A.38 : Suda tutulan S19 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.39 : Havada tutulan S20 numunelerinin bileşim parametreleri

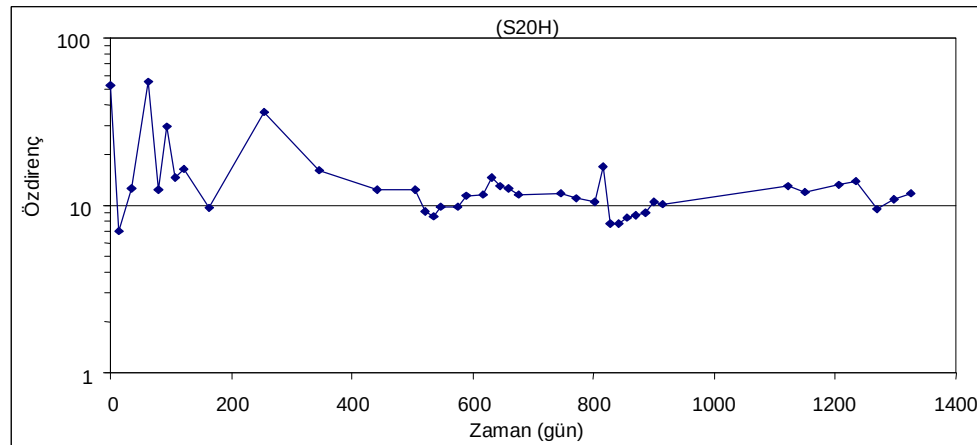
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)

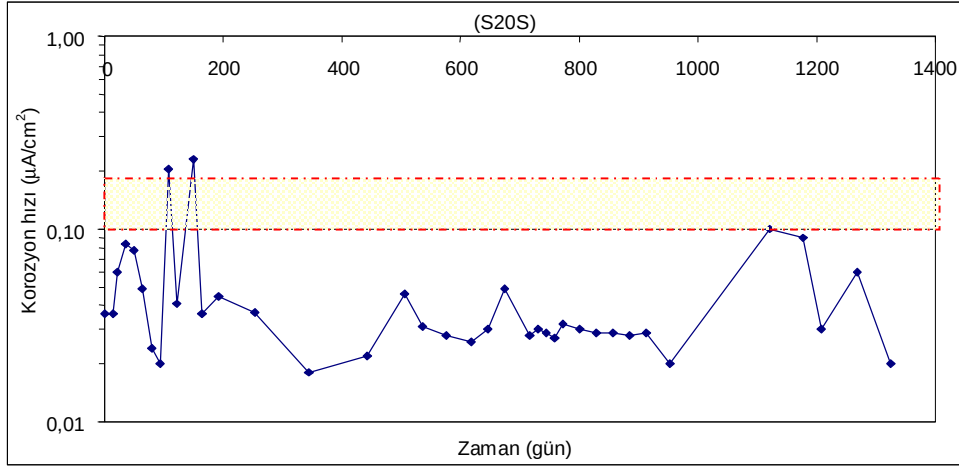


(c)

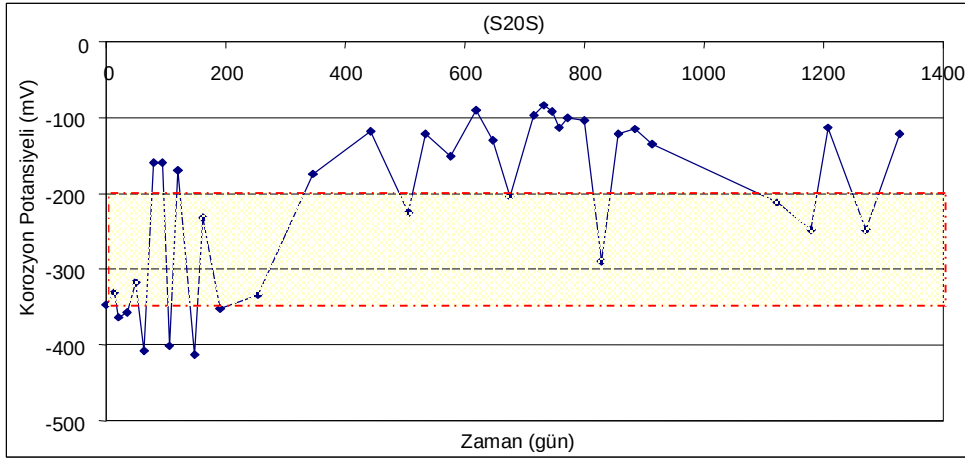
Şekil A.39 : Havada tutulan S20 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

Çizelge A.40 : Suda tutulan S20 numunelerinin bileşim parametreleri

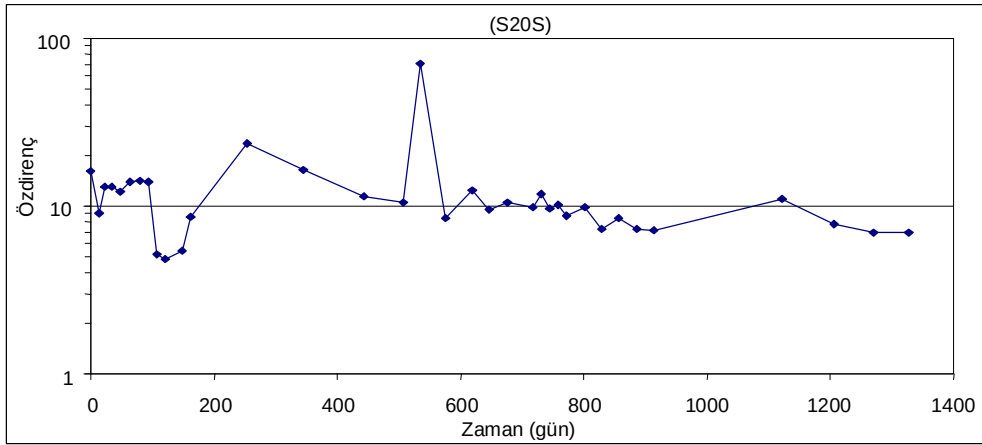
Toplam Bağlayıcı	Silis Dumanı /Toplam Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı
350,00	0,075	0,53



(a)



(b)



(c)

Şekil A.40 : Suda tutulan S20 numunelerine ait grafikler: a)Korozyon hızı. b)Korozyon potansiyeli. c)Özdirenç.

ÖZGEÇMİŞ

VEŞİKALIK
FOTO

Ad Soyad: Suzan YAMAÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: Bulgaristan 26-06-1979

Adres:

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi: