

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİS DUMANININ BETONUN DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş.Müh. Ersin Bora KURT**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2007**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİS DUMANININ BETONUN DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Ersin Bora KURT  
501041040**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mustafa Hulusi ÖZKUL  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü)  
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)**

**OCAK 2007**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, her zaman ilgi ve desteğini gördüğüm, değerli danışman hocam Sayın Prof.Dr.M.Hulusi ÖZKUL'a, gerek literatür araştırması, gerek deneysel çalışma aşamasında her zaman yanımda olan ve benden yardımlarını esirgemeyen Araştırma Görevlisi Sayın Ünal Anıl DOĞAN'a, deneysel çalışmalarım sırasında bana her yönden destek olan İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı çalışanlarına, her zaman yanımda olan değerli dostlarım B.Murat MÖREL'e, Seda GÜLŞAHİN'e ve bana maddi ve manevi her türlü desteği veren aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ersin Bora KURT

Ocak, 2007

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖNSÖZ</b>	<b>ii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>xvi</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xvii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xviii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Betonun Oluşturan Malzemeler	2
1.1.1 Agregalar	2
1.1.2 Çimento	2
1.1.3 Su	3
1.2 Betonun Mekanik Özellikleri	3
1.2.1 Betonun Basınç Dayanımı	3
1.2.1.1 Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler	4
1.3 Betonda Durabilite Kavramı	5
1.3.1 Betonun Geçirimsizlik Özellikleri	6
1.3.2 Betonda Kılcal Yolla Su Emme Miktarının Belirlenmesi	7
1.3.3 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Yöntemi	9
1.4 Puzolanlar	11
1.4.1 Yüksek Fırın Cürufu	12
1.4.2 Uçucu Kül	12
1.4.3 Silis Dumanı	13
1.4.3.1 Silis Dumanının Betonda Kullanımı	13
1.4.3.2 Silis Dumanının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi	14
1.4.3.3 Silis Dumanının Betonun Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi	14
<b>2. BETONA GÖMÜLÜ ÇELİKTE KOROZYON</b>	<b>16</b>
2.1 Çeliğin Beton İçerisindeki Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması	17
2.1.1 Betonun Alkalitesi	19
2.2 Betona Gömülü Çeliğin Korozyonuna Etki Eden Faktörler	20
2.2.1 Karbonatlaşma Etkisi	20
2.2.2 Klorür Etkisi	20
2.2.3 Betonun Özdirenci	21
2.3 Korozyon Ölçüm Yöntemleri	22
2.3.1 Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Ölçümü)	22
2.3.2 AC Empedans Yöntemi	24

2.3.3 Lineer Polarizasyon Yöntemi	25
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA</b>	<b>28</b>
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	28
3.1.1 Agregalar	28
3.1.2 Çimento	31
3.1.3 Silis Dumanı	33
3.1.4 Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	33
3.1.5 Donatı Çeliği	33
3.2 Merkezi Karma Tasarım Yöntemi	34
3.3 Beton Karışımları	35
3.4 Taze Beton Deneyleri	37
3.4.1 Çökme (Slump) Deneyi	37
3.4.2 Birim Ağırlık Deneyi	38
3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri	38
3.5.1 Basınç Deneyi	38
3.5.2 Kılcal Su Emme Deneyi	38
3.5.3 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi (ASTM C 1202-97)	40
3.5.4 Lineer Polarizasyon, Yarı Hücre ve Öz direnç Ölçümü	40
<b>4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>42</b>
4.1 Taze Beton Deneyleri Sonuçları	42
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları	43
4.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçları	43
4.2.2 Geçirimsizlik Deneyleri Sonuçları	44
4.2.2.1 Kılcal Su Emme Deney Sonuçları	44
4.2.2.2 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deney Sonuçları	45
4.3 İstatistiksel Değerlendirmeler	46
4.3.1 Basınç Dayanımları	47
4.3.2 Durabilite Deneyleri	51
4.3.2.1 Kılcal Su Emme Deney Sonuçları	51
4.3.2.2 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi Sonuçları	55
4.3.2.3 Etkin Porozite Deneyi Sonuçları	60
4.3.2.4 Öz direnç Ölçümleri	64
4.3.2.5 Korozyon Potansiyeli Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	65
4.3.3 Lineer Polarizasyon Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	65
4.3.4 Optimizasyon	66
<b>5. GENEL SONUÇLAR</b>	<b>68</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>70</b>

**EKLER**

**72**

**ÖZGEÇMİŞ**

**115**

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 1.1</b>	Beton Sınıfları ve Dayanımları..... 4
<b>Tablo 1.2</b>	Yüksekliğin Kesit Boyutuna Oranının Dayanıma Etkisi..... 4
<b>Tablo 1.3</b>	Geçen Akıma Göre Klorür Geçirimsizliği..... 11
<b>Tablo 1.4</b>	Betonların Klorür Geçirgenliğine Silis Dumanının Etkisi..... 15
<b>Tablo 2.1</b>	Betonda İzin Verilen Klorür Değerleri..... 21
<b>Tablo 2.2</b>	Betonun Özdirenci İle Korozyon Riski Arasındaki İlişki..... 22
<b>Tablo 2.3</b>	Korozyon Potansiyelinin Belirlenmesinde Kullanılan Referans Elektrod Değerleriyle Korozyon Riski Arasındaki İlişki..... 23
<b>Tablo 2.4</b>	Korozyon Akım Yoğunluğuna Göre Korozyon Durumu..... 27
<b>Tablo 3.1</b>	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Agregaların Özgül Ağırlıkları..... 28
<b>Tablo 3.2</b>	Doğal Kum İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları..... 29
<b>Tablo 3.3</b>	Kırmataş Kum İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları..... 29
<b>Tablo 3.4</b>	Kırmataş-I İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları..... 29
<b>Tablo 3.5</b>	Kırmataş-II İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları..... 30
<b>Tablo 3.6</b>	Beton Karışımında Kullanılan Agregaların Oranları..... 30
<b>Tablo 3.7</b>	Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri..... 32
<b>Tablo 3.8</b>	Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri..... 32
<b>Tablo 3.9</b>	Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı..... 32
<b>Tablo 3.10</b>	Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri..... 33
<b>Tablo 3.11</b>	Kullanılan Süper Akışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri..... 33
<b>Tablo 3.12</b>	Betonlar İçin Belirlenen Değişkenler ve Değişim Aralıkları..... 35
<b>Tablo 3.13</b>	Beton Karışım Oranları..... 36
<b>Tablo 4.1</b>	Taze Beton Deneylerinde Elde Edilen Sonuçlar ve Kullanılan Akışkanlaştırıcı Oranları..... 42
<b>Tablo 4.2</b>	Betonların Basınç Dayanımları (Hava Kürleri)..... 43
<b>Tablo 4.3</b>	Betonların Basınç Dayanımları (su Kürleri)..... 44
<b>Tablo 4.4</b>	Kılcal Su Emme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar..... 45
<b>Tablo 4.5</b>	Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi Sonuçları..... 46
<b>Tablo 4.6</b>	Basınç Dayanımları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri..... 47
<b>Tablo 4.7</b>	Basınç Dayanımları İçin Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri..... 48
<b>Tablo 4.8</b>	Kılcallık Katsayıları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri..... 52
<b>Tablo 4.9</b>	Kılcallık Katsayıları İçin Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri..... 52
<b>Tablo 4.10</b>	Klorür Geçirimsizliği Verileri Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri..... 56
<b>Tablo 4.11</b>	Klorür Geçirimsizliği Sonuçları İçin Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri..... 56

<b>Tablo 4.12</b>	Etkin Porozite Verileri Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri.....	60
<b>Tablo 4.13</b>	Etkin Porozite Katsayılarıyla Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri.....	61
<b>Tablo 4.14</b>	Yapılan Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler.....	66



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Şekil 1.1</b> : Kapilarite Deneyi Sonucunda Elde Edilen Tipik Su Emilim Eğrisi.....	8
<b>Şekil 1.2</b> : Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deney Düzeneği.....	11
<b>Şekil 2.1</b> : Çeliğin Beton İçindeki Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması.....	17
<b>Şekil 2.2</b> : Donatının Anot Kısmındaki Demirin Çözünüp Katotda Pas Oluşturması.....	18
<b>Şekil 2.3</b> : Betonarme Çeliğinde Korozyon Hızı İle pH Arasındaki İlişki....	19
<b>Şekil 2.4</b> : Bakır-Bakırsülfat Yarı Hücre Devresi.....	24
<b>Şekil 2.5</b> : Dış Akıma Karşı Polarizasyon Aşırı Gerilimi.....	26
<b>Şekil 2.6</b> : Linear Polarizasyon Ölçümünde Kullanılan Deney Düzeneği.....	27
<b>Şekil 3.1</b> : Beton üretiminde Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrisi...	31
<b>Şekil 3.2</b> : Donatının Epoksi İle Kaplanması.....	34
<b>Şekil 3.3</b> : Numune Şekilleri Ve Boyutları.....	37
<b>Şekil 3.4</b> : Kılcal Su Emme Deney Düzeneği.....	39
<b>Şekil 3.5</b> : Kılcal Geçirimsizlik Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan Grafik.....	39
<b>Şekil 3.6</b> : Korozyon Ölçümlerinde Kullanılan Gecor 8 Cihazı.....	41
<b>Şekil 4.1</b> : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi.....	48
<b>Şekil 4.2</b> : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi.....	49
<b>Şekil 4.3</b> : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi.....	49
<b>Şekil 4.4</b> : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi.....	50
<b>Şekil 4.5</b> : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi.....	50
<b>Şekil 4.6</b> : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi.....	51
<b>Şekil 4.7</b> : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi.....	53
<b>Şekil 4.8</b> : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi.....	53
<b>Şekil 4.9</b> : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi.....	54
<b>Şekil 4.10</b> : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi.....	54
<b>Şekil 4.11</b> : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi.....	55
<b>Şekil 4.12</b> : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi.....	55

<b>Şekil 4.13</b> : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsiliği Analizi.....	57
<b>Şekil 4.14</b> : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsiliği Analizi.....	58
<b>Şekil 4.15</b> : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsiliği Analizi.....	58
<b>Şekil 4.16</b> : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsiliği Analizi.....	59
<b>Şekil 4.17</b> : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsiliği Analizi.....	59
<b>Şekil 4.18</b> : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsiliği Analizi.....	60
<b>Şekil 4.19</b> : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi.....	62
<b>Şekil 4.20</b> : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi.....	62
<b>Şekil 4.21</b> : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi.....	63
<b>Şekil 4.22</b> : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi.....	63
<b>Şekil 4.23</b> : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi.....	64
<b>Şekil 4.24</b> : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi.....	64
<b>Şekil 4.25</b> : Hava Kürlerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimsilik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edilirliğin (D) Silis Dumanı/Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi.....	67
<b>Şekil 4.26</b> : Hava Kürlerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimsilik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edilirliğin (D) Silis Dumanı/Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi.....	67
<b>Şekil A.1</b> : Hava Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	73
<b>Şekil A.2</b> : Hava Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	73
<b>Şekil A.3</b> : Hava Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	73
<b>Şekil A.4</b> : Hava Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	74
<b>Şekil A.5</b> : Hava Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	74
<b>Şekil A.6</b> : Hava Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	74

<b>Şekil A.7</b> : Hava Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	75
<b>Şekil A.8</b> : Hava Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	75
<b>Şekil A.9</b> : Hava Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	75
<b>Şekil A.10</b> : Hava Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	76
<b>Şekil A.11</b> : Hava Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	76
<b>Şekil A.12</b> : Hava Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	76
<b>Şekil A.13</b> : Hava Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	77
<b>Şekil A.14</b> : Hava Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	77
<b>Şekil A.15</b> : Hava Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	77
<b>Şekil A.16</b> : Hava Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	78
<b>Şekil A.17</b> : Hava Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	78
<b>Şekil A.18</b> : Hava Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	78
<b>Şekil A.19</b> : Hava Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	79
<b>Şekil A.20</b> : Hava Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	79
<b>Şekil B.1</b> : Su Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	80
<b>Şekil B.2</b> : Su Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	80
<b>Şekil B.3</b> : Su Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	80
<b>Şekil B.4</b> : Su Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	81
<b>Şekil B.5</b> : Su Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	81
<b>Şekil B.6</b> : Su Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	81
<b>Şekil B.7</b> : Su Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	82
<b>Şekil B.8</b> : Su Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	82

<b>Şekil B.9</b>	Su Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	82
<b>Şekil B.10</b>	: Su Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	83
<b>Şekil B.11</b>	: Su Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	83
<b>Şekil B.12</b>	: Su Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	83
<b>Şekil B.13</b>	: Su Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	84
<b>Şekil B.14</b>	: Su Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	84
<b>Şekil B.15</b>	: Su Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	84
<b>Şekil B.16</b>	: Su Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	85
<b>Şekil B.17</b>	: Su Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	85
<b>Şekil B.18</b>	: Su Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	85
<b>Şekil B.19</b>	: Su Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	86
<b>Şekil B.20</b>	: Su Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi.....	86
<b>Şekil C.1</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	87
<b>Şekil C.2</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	87
<b>Şekil C.3</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	87
<b>Şekil C.4</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	88
<b>Şekil C.5</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	88
<b>Şekil C.6</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	88
<b>Şekil C.7</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	89
<b>Şekil C.8</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	89
<b>Şekil C.9</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	89
<b>Şekil C.10</b>	: Hava Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	90

<b>Şekil C.11</b> : Hava Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	90
<b>Şekil C.12</b> : Hava Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	90
<b>Şekil C.13</b> : Hava Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	91
<b>Şekil C.14</b> : Hava Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	91
<b>Şekil C.15</b> : Hava Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	91
<b>Şekil C.16</b> : Hava Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	92
<b>Şekil C.17</b> : Hava Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	92
<b>Şekil C.18</b> : Hava Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	92
<b>Şekil C.19</b> : Hava Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	93
<b>Şekil C.20</b> : Hava Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	93
<b>Şekil D.1</b> : Su Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	94
<b>Şekil D.2</b> : Su Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	94
<b>Şekil D.3</b> : Su Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	94
<b>Şekil D.4</b> : Su Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	95
<b>Şekil D.5</b> : Su Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	95
<b>Şekil D.6</b> : Su Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	95
<b>Şekil D.7</b> : Su Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	96
<b>Şekil D.8</b> : Su Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	96
<b>Şekil D.9</b> : Su Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	96
<b>Şekil D.10</b> : Su Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	97
<b>Şekil D.11</b> : Su Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	97
<b>Şekil D.12</b> : Su Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	97

<b>Şekil D.13</b> : Su Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	98
<b>Şekil D.14</b> : Su Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	98
<b>Şekil D.15</b> : Su Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	98
<b>Şekil D.16</b> : Su Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	99
<b>Şekil D.17</b> : Su Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	99
<b>Şekil D.18</b> : Su Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	99
<b>Şekil D.19</b> : Su Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	100
<b>Şekil D.20</b> : Su Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi.....	100
<b>Şekil E.1</b> : Hava Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	101
<b>Şekil E.2</b> : Hava Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	101
<b>Şekil E.3</b> : Hava Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	101
<b>Şekil E.4</b> : Hava Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	102
<b>Şekil E.5</b> : Hava Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	102
<b>Şekil E.6</b> : Hava Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	102
<b>Şekil E.7</b> : Hava Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	103
<b>Şekil E.8</b> : Hava Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	103
<b>Şekil E.9</b> : Hava Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	103
<b>Şekil E.10</b> : Hava Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	104
<b>Şekil E.11</b> : Hava Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	104
<b>Şekil E.12</b> : Hava Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	104
<b>Şekil E.13</b> : Hava Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	105
<b>Şekil E.14</b> : Hava Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	105

<b>Şekil E.15</b> : Hava Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	105
<b>Şekil E.16</b> : Hava Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	106
<b>Şekil E.17</b> : Hava Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	106
<b>Şekil E.18</b> : Hava Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	106
<b>Şekil E.19</b> : Hava Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	107
<b>Şekil E.20</b> : Hava Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	107
<b>Şekil F.1</b> : Su Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	108
<b>Şekil F.2</b> : Su Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	108
<b>Şekil F.3</b> : Su Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	108
<b>Şekil F.4</b> : Su Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	109
<b>Şekil F.5</b> : Su Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	109
<b>Şekil F.6</b> : Su Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	109
<b>Şekil F.7</b> : Su Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	110
<b>Şekil F.8</b> : Su Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	110
<b>Şekil F.9</b> : Su Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	110
<b>Şekil F.10</b> : Su Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	111
<b>Şekil F.11</b> : Su Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	111
<b>Şekil F.12</b> : Su Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	111
<b>Şekil F.13</b> : Su Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	112
<b>Şekil F.14</b> : Su Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	112
<b>Şekil F.15</b> : Su Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	112
<b>Şekil F.16</b> : Su Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi.....	113

<b>Şekil F.17</b> : Su Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Hızı- Zaman İlişkisi.....	113
<b>Şekil F.18</b> : Su Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Hızı- Zaman İlişkisi.....	113
<b>Şekil F.19</b> : Su Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Hızı- Zaman İlişkisi.....	114
<b>Şekil F.20</b> : Su Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Hızı- Zaman İlişkisi.....	114



## SEMBOL LİSTESİ

$a_0$	: Denklem sabiti.
$a_1$	: Toplam bağlayıcı katsayısı
$a_2$	: Silis dumanı/Bağlayıcı katsayısı
$a_3$	: Su/Bağlayıcı katsayısı
$a_4$	: (Toplam Bağ.) <sup>2</sup> katsayısı
$a_5$	: (Silis D./Bağlayıcı) <sup>2</sup> katsayısı
$a_6$	: (Su/Bağlayıcı) <sup>2</sup> katsayısı
$a_7$	: (Top.Bağ.) x (Silis D.) katsayısı
$a_8$	: (Top.Bağ.)x (Su/Bağ.) katsayısı
$a_9$	: (Silis D./Bağ.) x (Su/Bağ.) katsayısı
A	: Numunenin Kesit Alanı
$A_k$	: Aktif olarak korozyona uğrayan alan
$\alpha$	: Merkezi karma tasarım aralık değeri
B	: Orantı sabiti
$\beta_a$	: Anodik Tafel sabiti
$\beta_c$	: Katodik Tafel sabiti
D	: Numune çapı
$\Delta E$	: Polarizasyon değişimi
$\Delta I$	: Akım değişimi
$\Delta Q$	: Ağırlık değişimi
$E_{corr}$	: Korozyon potansiyeli
$\epsilon_e$	: Etkin porozite
h	: Numune yüksekliği
$i_{corr}$	: Korozyon akım yoğunluğu
$I_0$	: İlk akım değeri (amper)
$I_t$	: t anındaki akım değeri (amper)
k	: Kılcallık katsayısı
l	: Numune boyu
m	: Penetrasyon direnci
MKT	: Merkezi karma tasarım
Q	: Yük (coulomb)
$Q_n$	: $t_n$ anında numune ağırlığı
$Q_0$	: Numunenin ilk ağırlığı
S	: 1 m <sup>3</sup> betonda kullanılan su miktarı
SD	: 1 m <sup>3</sup> betonda kullanılan silis dumanı miktarı
TB	: 1 m <sup>3</sup> betonda kullanılan toplam bağlayıcı miktarı
$t_d$	: Zaman (dakika)
$t_n$	: Eşik zaman
w	: Numune genişliği
$\sigma$	: Standart sapma
r	: Korelasyon katsayısı

## BETONUN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE SİLİS DUMANININ ETKİSİ

### ÖZET

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. Daha kalıcı betonlar üretmek için günümüzde bir çok çalışma yapılmaktadır. Çimentodan daha ince olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemelerin yeni nesil akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması daha dayanıklı betonlar üretilmesine olanak sağlamıştır. Betonun durabilitesini ve dayanımını arttıran puzolanik malzemelerin bu olumlu etkilerinin görülebilmesi için kür koşullarına da titizlikle uyulması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında silis dumanının betonun basınç dayanımına, kılcal yolla su emmesine, klorür geçirimsizliğine ve öz direncine etkisi araştırılmıştır. Bu özellikler ile betona gömülü çelikte korozyon durumu arasındaki ilişki de ayrıca araştırılmıştır. Çalışma kapsamında merkezi karma tasarım yöntemi kullanılarak beton karışım oranları belirlenmiş ve bu karışım oranları doğrultusunda farklı silis dumanı/toplam bağlayıcı, su/toplam bağlayıcı ve toplam bağlayıcı oranları kullanılarak yirmi farklı beton üretilmiştir. 15x15x15 cm'lik küp numuneler basınç dayanımı deneyi için, 7x7x28 cm prizma numuneler kılcallık deneyi için ve 10x20 cm'lik (çap x yükseklik) silindir numuneler hızlı klorür geçirimsizliği deneyi için üretilmiştir. İçerisine 10 cm çapında nervürlü inşaat demiri yerleştirilen 10x20 cm'lik silindir lolipop numuneler korozyon ölçümlerinde kullanılmıştır. Numunelerin yarısı suda ve yarısı havada bekletilmiştir. 90 günlük kür süresinin ardından betonların basınç dayanımları, kılcallık katsayıları, kılcal penetrasyon direnci katsayıları, etkin porozite katsayıları bulunmuş ve ASTM C1202-97 standardına göre betonların klorür difüzyonuna karşı performansları belirlenmiştir. Kür süresinin ardından lolipop numuneler bir molar NaCl çözeltisine konulmuş ve Gecor 8 cihazı ile (Korozyon ölçüm sistemi) iki haftada bir olmak üzere öz direnç, yarı hücre potansiyeli ve korozyon hızı ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, silis dumanı katılmasının genel olarak betonun dayanıklılığını arttırdığını göstermiştir.

# **EFFECT OF SILICA FUME ON DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE**

## **SUMMARY**

The durability of concrete can be explained as the resistance of a structure to environmental effects during its service life. Long service life is not only related with the choosing the correct structural system, project and construction. At the same time precautions must be taken in order to make the structure durable for a logical time period and decrease the rate of damages with less maintenance. In order to produce more durable concretes, many studies are being done. Using pozzolanic materials finer than cement like silica fume, fly ash, ground granulated blast furnace slag with superplasticizer gives opportunity to produce more durable concretes. To get the positive effects like increase in compressive strength, improvement of durability of pozzolanic materials, cure must be carefully done.

In this study the effect of silica fume addition on compressive strength, capillarity, chloride penetration and resistivity of concrete was investigated. The relation between these properties and corrosion of embedded steel in concrete was also investigated. Central composite design method was used to design the testing variables and twenty different concretes were produced with different values of silica fume/total binder ratio, water/total binder ratio and total binder content. The concrete specimens were 15x15x15 cm cubes for compression testing, 7x7x28 cm prisms for capillarity and 10x20 cm (diameter x height) cylinders for RCP testing. Lollipop 10x20 cm cylindrical specimens, in which 10 mm deformed steel bars embedded, were used for corrosion measurements. Half of the specimens were stored in water and the other half in air. After the 90 days curing period the compressive strengths, capillarity coefficients, capillary-penetration resistance coefficients, effective porosity coefficients were found and also according to ASTM C1202-97 standard the chloride penetration performances of concretes were determined. After the curing period, the lollipop specimens were put in to the one molar NaCl solution, and every two weeks with Gecor 8 system (Corrosion measuring system), the resistivity and half cell potential and linear polarization measurements were made on lollipop specimens. Test results showed that addition of silica fume improves the durability properties of concrete in general.

## 1. GİRİŞ

Beton kum, çakıl (veya kırma taş, hafif agrega v.b.), çimento, mineral, kimyasal katkıları ve suyun karıştırılmasıyla meydana gelen bir yapı malzemesidir. Bu malzemeler hesaplanmış belirli oranlarda bir araya getirildiğinde, kalıplarda istenilen biçimi alabilecek plastik bir malzeme elde edilir. Beton yapı endüstrisinde kullanılan diğer malzemelerden farklı ve daha üstün kılan en önemli özelliklerinden biri, istenilen biçimin verilebilmesini sağlayan plastik kıvamıdır. Beton karıştırılıp kalıba döküldükten kısa bir süre sonra prizini alır ve zamanla dayanım kazanır [1].

Betonarme yapıların hesap kriterlerini belirlemek için çalışmalar yapılmış ve ilk yönetmelikler Almanya'da 1904 yılında ve Fransa'da 1906 yılında yayınlanmıştır [2]. Ülkemizde yönetmelik uygulaması Alman Betonarme Yönetmeliği'nin kullanılmasıyla başlar. Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti'nin 1953'te hazırladığı yönetmelik, yapılan bazı değişikliklerle birlikte 1953 ve 1962 de tekrar yayınlanmıştır. Türk Standartları Enstitüsü'nün hazırladığı TS 500: Betonarme yapıların Hesap ve Yapım Kuralları yönetmeliği ise 1975 yılından itibaren geçerli olmuştur. Günümüzde geçerli olan ise 2000 yılında son baskısı yayınlanan TS 500-2000 yönetmeliğidir [2]. TS 500'e ek olarak Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik de ülkemizde uygulanmaktadır.

Betonun kalitesi için esas alınan ölçüt betonun basınç dayanımıdır. Beton üzerinde yapılmış araştırmalarda, betonun basınç dayanımı ile malzemenin muhtelif özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve betonun diğer mekanik özelliklerinin basınç dayanımı ile aynı eğilimde olduğu gözlemlenmiştir [3]. Bununla birlikte çeşitli çevresel koşullar devreye girdiğinde basınç dayanımının yanı sıra, betonda durabilite kavramı da ön plana çıkmaktadır. Özellikle bir deprem ülkesi olan ülkemizde yapıların maruz kalacağı olumsuz çevresel şartlar nedeniyle beton içindeki donatının korozyonu gibi istenmeyen durumların önüne geçilmesinde durabilitesi yüksek betonların üretimi önem kazanmaktadır.

## 1.1 Betonu Oluşturan Malzemeler

### 1.1.1 Agregalar

Mineral kökenli olup boyutları genellikle 100 mm'ye kadar çıkan tanelerden oluşan malzemeye agrega denir. Betonun hacim bazında %60 - %80'ini, ağırlıkça da 4/5'ini agrega oluşturur. Taze ve sertleşmiş betonun özellikleri, karışım oranları ve maliyet agreganın özelliklerinden önemli derecede etkilenir.

Beton agregası doğal kum ve çakıl karışımlarından, ayrıca yapay kırmataş (mıcır) malzemedan meydana gelir. Doğal agregalar taş ocaklarından, kurak mevsimde dere yataklarından, deniz ve nehir tabanlarından elde edilirler. İstenen agrega boyutlarının elde edilebilmesi için ise büyük taş kütleleri konkasörde kırılırlar. Bu şekilde oluşan köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip malzemelere mıcır adı verilir ve mıcır bu özellikleriyle doğal kum ve çakıldan ayrılır [4].

### 1.1.2 Çimento

Çimento, su ile karıştırıldığında, az veya çok akıcı niteliğe kavuşan, sadece suyun etkisiyle priz yapan, katılaştıran ve sertleşen ince taneli malzemedir. Çimento, kimyasal yönden duyarsız çakıl, kırma taş, kum gibi mineral malzemelerin büyük miktarlarda ve değişik oranlarda bir araya gelerek katı bir cisim oluşturmasında bağlayıcılık rolü üstlenir. Teknik ve ekonomik yönden genel eğilim ise ana bileşen olarak portland klinkeri yanı sıra, puzolanların, yüksek fırın cürufalarının ve termik santral uçucu küllerinin ikincil bileşen olarak kullanılmasıdır.

Çimentonun karışımdaki ana görevi, katılacak betona mekanik mukavemetini sağlamaktır. Çimentonun ince taneli dokusunun, kaba yerleştirilmiş betonun yoğunluğunun artırılmasında ve priz öncesi karışımın işlenebilirliğinde önemli rolü bulunur. Betonun mukavemetinin yükseltilebilmesinde işlenebilirlik ve yoğunluk en önemli iki etkendir.

Portland çimentoları, klinkerin kütlece yaklaşık %3 - %5 oranındaki alçı taşı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen katkısız hidrolik bağlayıcılardır. Klinker kompozisyonu ve öğütme inceliği farkıyla PÇ 42,5 ve PÇ 52,5 oluşturulur [4].

### **1.1.3 Su**

Beton karışımının üretilmesinde kullanılan suya çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü karma suyunda bulunabilecek 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 [4].

## **1.2 Betonun Mekanik Özellikleri**

Beton, basınç dayanımı yüksek, ancak buna karşılık çekme dayanımı düşük olan gevrek bir malzemedir. Betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında yaklaşık 1/10 gibi bir oran vardır. Çok düşük çekme dayanımına sahip olmasından dolayı genellikle hesaplarda dikkate alınmaz. Bu nedenle betonun dikkate alınan en önemli özelliği basınç dayanımıdır. Yapı elemanlarının servis süreleri boyunca deprem, rüzgar gibi tekrarlanan yüklerin etkisi altında kalacağı göz önüne alındığında betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin de bilinmesi gerekmektedir [1].

### **1.2.1 Betonun Basınç Dayanımı**

Betonun basınç dayanımının belirlenmesinde, beton numunesinin yaşı, boyutları, yükleme hızı ve yükleme türünün önemli ölçüde etkisi vardır. Betonun dayanımının sınıflandırılmasında, üretiminden 28 gün sonra elde edilen dayanım kullanılmaktadır. Betonun standart basınç dayanımının belirlenmesinde 28 gün kirece doymun suda bekletilmiş, çapı 150 mm ve boyu 300 mm olan silindir numunelerin tek eksenli yük altındaki dayanımı olarak tanımlanmıştır. Betonun gerilme cinsinden dayanımı, betonun kırıldığı yükün silindir numunenin kesit alanına bölünmesiyle elde edilir. Elde edilen dayanıma göre beton sınıfı belirlenir [1,2].

Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde basınç dayanımının belirlenmesinde 200x200x200 veya 150x150x150 mm'lik küp numuneler de kullanılmaktadır. Silindir numuneler ile küp numunelerin dayanımlarının arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan araştırmalarda silindir numunelerin dayanımlarının küp numunelerin dayanımlarına oranının ortalama 0.8-0.85 olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bulunan bu değerler yaklaşık değerlerdir ve çevirilerde %30'lara varan hatalar da

olabilmektedir. Tablo 1.1’de beton sınıfları ve silindir numuneler ile küp numunelerinin dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir [1].

**Tablo 1.1 : Beton Sınıfları ve Dayanımları [2]**

Beton Sınıfı	Karakteristik Silindir Basınç Dayanımı $f_{ck}$ (MPa)	Eşdeğer küp dayanımı (MPa)
C14	14	16
C16	16	20
C20	20	25
C25	25	30
C30	30	35
C35	35	40
C40	40	45
C45	45	50
C50	50	55

#### 1.2.1.1 Betonun Basınç Dayanımına Etki Eden Faktörler

Betonun basınç dayanımına etki eden faktörler olarak beton bileşenleri, beton numunesinin şekil ve boyutları, beton numunesine uygulanan yükleme hızını gösterebiliriz.

Beton dayanımını etkileyen en önemli faktör su/bağlayıcı oranıdır. Bununla birlikte numunenin kuru, deney yapılacak numunenin nem durumu gibi betonun üretilmesinden sonraki koşulların da betonun dayanımına etkisi vardır [1].

**Tablo 1.2 : Yüksekliğin Kesit Boyutuna Oranının, Dayanıma Etkisi [1].**

Yükseklik/kesit alanı	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Basınç dayanımının, boyu enine eşit bir numune dayanımına oranı	1.0	0.87	0.8	0.75	0.74

Beton numunesinin basınç dayanımının belirlenmesinde, beton numunesinin şekil ve boyutları da önemli rol oynamaktadır. Pres tablası ile numunenin yüzeyleri arasında oluşan kesme kuvvetlerinin etkisi, yükün uygulandığı yüzeyden uzaklaştıkça azalmaktadır. Numunenin yüksekliği arttıkça kesme kuvvetlerinin etkisi kırılmayı

daha az etkilemektedir. Numunenin yüksekliğinin, numunenin kesit alanına oranı arasındaki ilişki ile ilgili yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen değerler Tablo 1.2’de verilmiştir.

Yükleme hızı da deney sonucunda elde edilen dayanım değerini önemli ölçüde etkiler. Betonun dayanımının belirlenmesinde numuneye yüklenen yükün hızının etkisi ile ilgili yapılan araştırmalarda, hızlı yüklenen bir numunenin, yavaş yüklenen numuneye göre daha yüksek dayanımının olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ülkemizdeki yönetmeliklerde betonun dayanımının belirlenmesi için yapılan deneylerdeki yükleme hızının genellikle 0.1 MPa/saniye olarak verilmektedir [1].

### **1.3 Betonda Durabilite Kavramı**

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 [5].

Beton, kullanılacağı yapısal sistemin koşullarına göre tasarlanmış ve gerekli kalite kontrol prosedürlerine uyularak hazırlanmış, yerleştirilmiş ve kür uygulanmışsa, servis süresi boyunca hiçbir onarım gerektirmeden görevini yerine getirir. Ancak çeşitli dış ve iç etkiler altında betonun performansının düştüğü durumlar olur. Dayanıklı başka bir deyişle kalıcı bir beton; bu etkilere karşı bozulmadan ve kendisinden beklenen performansı düşürmeden direnç gösteren betondur. Dolayısıyla, betonun durabilitesi mekanik yükler dışında bulunduğu ortamdaki kimyasal ve fiziksel etkilere karşı bozulmadan direnç göstermesi olarak tanımlanabilir.

Söz konusu kimyasal ve fiziksel etkilere örnek olarak; kıyı veya açık deniz yapılarındaki dalga hareketi, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi fiziksel nedenlerden ileri gelebileceği gibi asit, klorür, sülfat etkisi, karbonatlaşma betonun içerisindeki çeliğin korozyonu ve alkalisilika reaksiyonu gibi kimyasal nedenler de söz konusudur. Alt yapıda ve binalarda kullanılan beton için üretim sırasında ve



kullanımda, ortam koşullarının gerektirdiği önlemlerin alınmaması durumunda durabilite sorunuyla karşılaşılır [5].

Betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması durabilite yönünden yararlıdır. Başka bir ifadeyle durabilite ve geçirimsizlik birbiriyle yakından ilgili olan iki olaydır. Beton ne kadar boşluksuz olursa geçirimsizliği de buna bağlı olarak düşük olur; bu da betonarme yapılarda, beton içerisindeki çeliğin kimyasal etkilere maruz kalmadan servis süresi boyunca sağlıklı bir şekilde hizmet vermesini sağlar.

Çimentodan daha ince olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemelerin süper ve hiper akışkanlaştırıcı olarak bilinen yeni nesil akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması daha dayanıklı betonlar üretilmesine olanak sağlamıştır. Ultra incelikteki malzemeler ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların birlikte kullanılması betondaki su/çimento oranının düşmesini sağlayarak ortaya çıkan artan su ihtiyacı problemini ortadan kaldırmıştır. Betonun durabilitesini ve dayanımını arttıran puzolanik malzemelerin bu olumlu etkilerinin görülebilmesi için kür koşullarına da titizlikle uyulması gerekmektedir [5,6].

### **1.3.1 Betonun Geçirimsizlik Özellikleri**

Durabilitesi yüksek bir betonarme yapı elde edebilmek için, betonun ve içerisindeki donatının çevresel olumsuzluklardan korunması gerekmektedir. Boşluklu bir malzeme olan betonun içinden basınç altında akışkan geçişi doğaldır. Bununla birlikte basınç olmadan da doğal koşullarda kılcal etki nedeni ile su geçirimsizliği meydana gelebilir Yapının bulunduğu ortama ve kullanım amacına göre su ya da çeşitli zararlı kimyasallar betonun içerisine girerek yapıya zarar verir. Bu tür olumsuzlukların önüne geçmek için kullanılan betonun geçirimsizlik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Geçirimsizlik su altı yapılarında, su depolarında, beton borularda ve barajlarda çok daha önem kazanmaktadır [7].

Betonda kullanılacağı yerdeki çevresel şartlara göre geçirimsizliği tespit etmek amacıyla kılcal su emme, basınçlı geçirimsizlik, klorür geçirimsizliği gibi deneyler yapılmaktadır.

### 1.3.2 Betonda Kılcal Yolla Su Emme Miktarının Belirlenmesi

Betonda kılcal su emme, betonun suya değen yüzünden zamanla emilen su miktarı ile belirlenir. Çok küçük çaplı boşluklar içerisinde emilen su kılcallık etkisi ile yükselir. Betonarme yapılarda olması istenmeyen bu durumun kontrolü için, betonda kılcal su emme deneyi yapılır. Bu deneyde üretilen beton, prizma şeklindeki kalıplara yerleştirilir. Deney zamanı geldiğinde, numuneler önce 70°C’lik etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kuruması sağlanır. Numunelerin su yüzüne temas eden yüzeyi haricindeki yüzeylerinden su emmesini önlemek için parafinle kaplanır ve kuru ağırlığı belirlenir. Daha sonra numunenin bir yüzü su ile temas edecek şekilde tepsiye yerleştirilir ve belirli aralıklarla ağırlığı ölçülür. Yapılan çalışmalarda emilen suyun hacminin zamanın karekökü ile doğru orantılı olduğu belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik kabul edilmiştir [7,8].

$$\frac{\Delta Q}{A} = k \times \sqrt{t_d} \quad (1.1)$$

burada;

$\Delta Q$ : Numune ağırlığındaki değişim (g)

A : Numunenin su yüzeyine temas eden taban alanı (cm<sup>2</sup>)

k : Kılcallık katsayısı

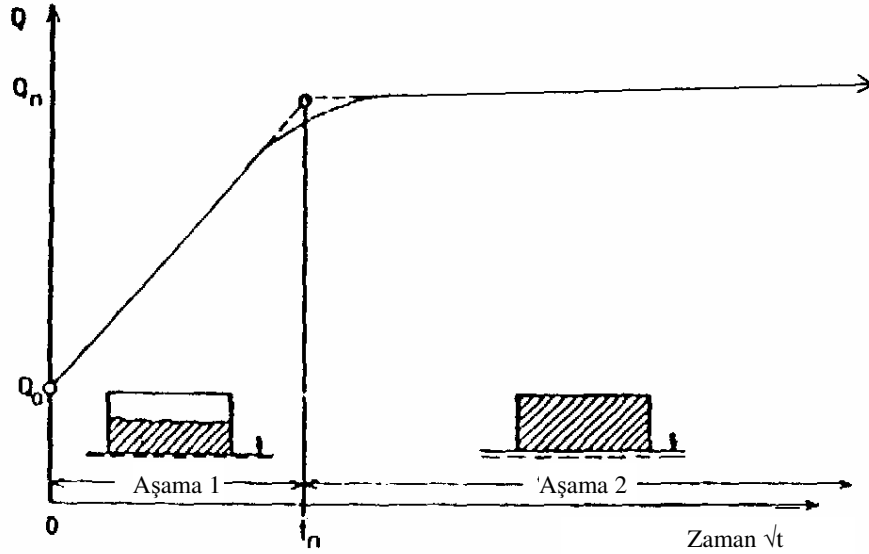
$t_d$  : Son okumanın yapıldığı zamanı temsil etmektedir (dk)

Göran Fagerlund tarafından yapılan bir çalışmada ise toplam kapilarite olayının üç katsayı ile tanımlanabileceği belirtilmiştir. Bu katsayılar;

- Kılcallık katsayısı
- Penetrasyon direnci katsayısı
- Etkin porozite katsayısı

Fagerlund yönteminde, kılcallık katsayısı (k) nın belirlenmesi için yapılan deneyde kılcal su emme olayı iki aşamada ele alınır. Şekil 1.1’de verilen grafikte görüldüğü

gibi numunede ağırlık artışının sona erdiği bir kırılma zamanı ( $t_n$ ) bulunur. Bulunan bu  $t_n$  değeri denklem (1.2)'de kullanılarak kılcallık katsayısı hesaplanır.



**Şekil 1.1 :** Kapilarite Deneyi Sonucunda Elde Edilen Tipik Su emilim Eğrisi [9]

$$k = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} \times \frac{1}{A} \quad (1.2)$$

$k$  : Kılcallık katsayısı ( $\frac{kg}{m^2 \times \sqrt{sn}}$ )

$t_n$  : 1. ve 2. aşamanın eğilim çizgilerinin kesiştiği zaman (sn)

$A$  : Numunenin suya temas eden yüzey alanı

$Q_0$  : Numunenin ilk ağırlığı (kg)

$Q_n$  : Bulunan  $t_n$  değerine karşılık gelen numune ağırlığı (kg)

Betonun penetrasyon direnci, geçirimsizliğe karşı olan dayanıklılığı hakkında fikir vermektedir. Penetrasyon Direnci Katsayısının hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$m = \frac{t_n}{h^2} \quad (1.3)$$

Burada;

$m$  :Su penetrasyonuna direnç (sn/m<sup>2</sup>)

$t_n$  :Numunenin ağırlık artışının sona erdiği zaman (sn)

$h$  :Numunenin yüksekliği (m)

olarak nitelendirilmiştir.

Etkin porozite, beton numunesinin içerdiği boşluk hacminin, kılcal su emme sonucunda dolabilen hacmi ya da başka bir ifade ile su emebilecek boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_0}{A \times h \times 1000} \quad (1.4)$$

$\varepsilon_e$  :Etkin porozite

1000: Suyun özgül ağırlığını (kg/m<sup>2</sup>)

$Q_n$  : Numunenin ilk ağırlığını (kg)

$Q_0$  : Numunenin son ağırlığını (kg)

$A$  : Numunenin yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$h$  : Numunenin yüksekliğini (m) temsil etmektedir.

### 1.3.3 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Yöntemi

Betonun içerisindeki donatının korozyona uğramasındaki en büyük etkenlerden biri de klorür iyonlarıdır. Klorür iyonları betonarme yapılarda betonun içerisine girerek ortamın pH'ını düşürür. Ortamın bazikliğinin azalmasıyla birlikte beton içerisindeki donatının etrafındaki koruma tabakası ortadan kalkar ve donatı paslanmaya başlar. Bu şartlar altında yapının servis süresi boyunca istenilen performansı vermesi beklenemez. Bu nedenle durabilitesi yüksek bir beton üretebilmek için, betonun klorür geçirimsizliğinin de mümkün olduğu kadar düşük olması gerekmektedir [10].

Betonun klorür geçirimsizliğinin ölçülmesi için çeşitli deney metotları bulunmaktadır. Bu deney metotlarından bir tanesi de ASTM C 1202 Betonun klorür penetrasyonuna karşı direncinin elektriksel olarak belirlenmesi metodudur [10]. Bu deney metodunda temel alınan düşünce, oluşturulan 60 V'luk potansiyel fark sonucunda klor iyonlarının betonun bir yüzeyinden girerek diğer tarafa geçebilmesi için betonun diğer yüzeyinden elektron geçmesi gerekliliği ve dolayısıyla akım oluşturmasıdır. Bu deney düzeneği için vakum pompası ve manometreli vakum hücresi,  $60 \pm 0,1$  V sabit gerilim sağlayabilecek güç kaynağı ,  $0,01 \Omega$  Shunt direnci,  $90^\circ\text{C}$  sıcaklığa dayanıklı pleksiglas hücreler ve bu hücreler için pirinç halkalar gerekmektedir. Standartta tarif edilen yöntemeye göre, 90 gün bekletilen 100 mm çapında silindir numune, 50 mm yükseklikte olacak şekilde üç eşit parçaya bölünür. Numunelerin 50 mm yükseklikte olan bölümüne elektrik iletmeyen bir malzeme ile kaplanır ve vakum haznesine konulur. Vakum haznesinde 3 saat süre ile 1 mm Hg den daha düşük basıncın altında bekletilen numunelerin, kaptaki mevcut basınç değişmeden saf su altında kalması sağlanır ve 1 saat süre ile bu şekilde vakum yapmaya devam edilir. Vakumlama işleminin ardından numuneler  $18 \pm 2$  saat süre ile saf suda bekletilir ve deney aşamasına geçilir. Deney için Şekil 1.2'deki düzeneğe yerleştirilen numunelerin etraflarına çözelti sızıntısının engellenmesi için çabuk kuruyan silikon sürülür ve hücrelerin birine %3'lük NaCl çözeltisi , diğerine 0.3N NaOH çözeltisi doldurulur. İçerisinde NaCl bulunan hücreye (-), diğer hücreye (+) kutuplu uç bağlanır ve 60 voltluk gerilim verilir. Deneyin başladığı anda ilk akım ölçülür ve 6. saate kadar her 30 dakikada bir devreden geçen akım ölçülür [11].

Ölçülen akım değerleri standartta belirtilen formül ile hesaplanır;

$$Q = 900 ( I_0 + I_{30} + \dots + I_{360} ) \quad (1.5)$$

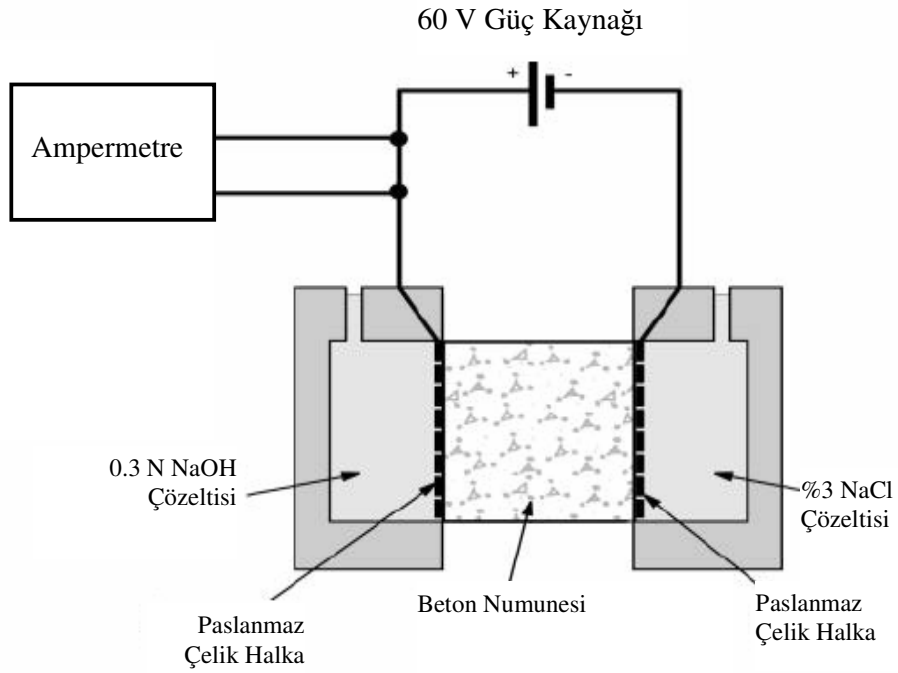
Burada;

Q: Yük (coulomb)

$I_0$ : Düzeneğe akım uygulandığı anda ölçülen akım (amper)

$I_t$ : Düzeneğe akım uygulanmasından t dakika sonra ölçülen akım (amper)

Deney sonucunda hesaplanan akıma göre betonun klorür geçirimsiliği Tablo 1.3’de verilen değerlerle karşılaştırılarak belirlenir.



Şekil 1.2 : Hızlı Klorür Geçirimsiliği Deney Düzenegi

Tablo 1.3 : Geçen Akıma Göre Klorür Geçirimsiliği [11].

Geçen Akım (coulomb)	Klorür Geçirimsiliği
>4.000	Yüksek
2.000-4.000	Orta
1.000-2.000	Düşük
100-1.000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

#### 1.4 Puzolanlar

İnce öğütülmüş silisli ve alüminli maddeler olan puzolanlar, tek başına bağlayıcı özellikleri olmadığı halde su karşısında çimentonun serbest kireci ile birleşerek bağlayıcı özelliğine kavuşurlar [12]. Puzolanlar doğal ve yapay olarak ikiye ayrılır.

Almanya'nın Ren bölgesinde çıkartılan doğal puzolanlara tras adı verilmektedir. Çok üstün özelliklere sahip bu puzolan ülkemizde de Orta Anadolu Bölgesinde bulunmaktadır. Yapay puzolanlara örnek olarak pişmiş kil, uçucu kül, öğütülmüş tuğla ve yağlı kireç karışımı olan Horasan, yüksek fırın cürufu, silis dumanı verilebilir [13].

#### **1.4.1 Yüksek Fırın Cürufu**

Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu (ÖGYFC), ham demir üretiminde yüksek fırınlarda atık malzeme olarak elde edilir. Ham demir üretiminde kullanılan demir filizi, kok kömürü ve kireçtaşının, yüksek fırınlarda pişirilmesi, yoğunluğu ham demire göre daha az olan ÖGYFC, ham demirin üzerinde erimiş halde yer alır. Ham demir ve ÖGYFC ayrı ayrı çıkışlardan dışarı çıkar. Dışarıya çıkan yaklaşık 1500°C'deki ÖGYFC ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), su içerisinde hızlı bir şekilde soğutulması sonucunda, hem irili ufaklı kum taneleri boyutunda granüle duruma gelmekte, hem de büyük oranda amorf (camsı) yapı kazanmaktadır. Meydana gelen bu yarı kararlı camsı yapı sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanılarak ya da ince öğütülmek ve portland çimentosunun hidrasyonu ile ortaya çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'yi kullanmak sureti ile hidrolik özelliğe sahip olur [14].

ÖGYFC uygulamada üç farklı şekilde kullanılmaktadır:

- Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirilerek, hidrolik bağlayıcı madde olarak doğrudan kullanılabilen,
- Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülerek, "cürufu çimento" üretiminde kullanılabilen,
- Beton katkı maddesi olarak kullanılabilir.

#### **1.4.2 Uçucu Kül**

Kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık ürünü olan uçucu kül silisli ve alüminli bileşimi nedeniyle puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi kullanılmaktadır. İnce ve küresel taneleri sayesinde taze betonda işlenebilmeyi artırır; ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimentonun

hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur ve bu sayede çimento hamurundaki boşlukları doldurarak betona dayanıklılık kazandırır [15].

### **1.4.3 Silis Dumanı**

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kok kömürü ve odun parçacıkları ile redüksiyonu sonucunda elde edilen çok ince taneli tozdur. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO, elektrik ark fırınının daha düşük sıcaklıktaki üst kısımlarında ya da sisteme ilave edilen kollektörlerde hızla okside olur ve amorf yapıda SiO<sub>2</sub> olarak yoğunlaşarak yüzey alanı 220,000-300,000 cm<sup>2</sup>/g olan silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur. Silis dumanının çimentoda katkı olarak kullanılması 1969 yılında Norveç’de denenmiş ancak betonda katkı olarak kullanılmaya başlaması beton akışkanlaştırıcıların kullanıma girmesiyle birlikte olmuştur. Silis dumanı ülkemizde Antalya’da bulunan Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir. Silis dumanının piyasaya arzında 80x80x140 cm ebatlarında bez torbaları kullanılmaktadır. Ultra ince taneli oluşu sebebiyle nakliyesi ve depolaması sırasında mümkün olduğunca dikkatli olunmalıdır. Ayrıca boşaltma sırasında ince toz halinde ortama kolayca yayılabilir. Bu gibi sakıncaların önüne geçebilmek için piyasaya arz sırasında ağırlıkça ortalama %50 oranında su ile karıştırılabilir, ayrıca bu haldeki silis dumanının varillerle taşınması da mümkündür. Çok ince bir malzeme olduğundan, silis dumanı ile çalışırken ortamın havasında bulunan tozlanmanın en aza indirilmesi ve çalışan kişilerin maske ile kendilerini koruyucu önlemleri almaları gerekmektedir [16,17].

#### **1.4.3.1 Silis Dumanının Betonda Kullanımı**

Normal Portland çimentosundan yaklaşık 100 kat daha ince olan Silis dumanı, bu sayede çimento tanelerinin arasında kalan boşlukları doldurur ve ince boşluklardaki suyun serbest suya dönüşmesini sağlar. Buna karşılık Normal Portland çimentosuyla kıyaslandığında çökme değerlerinde yaklaşık %70 oranında bir azalma durumu meydana gelir. Bu olumsuzluğu bertaraf etmek için günümüzde süper ya da hiper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır [16].



### **1.4.3.2 Silis Dumanının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi**

Silis dumanının süper akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanımı ile beton dayanımlarında yüksek değerlere ulaşılacağı kanıtlanmıştır. Bu durum azalan boşluk oranı ve silis dumanının geçiş zonundaki aktivitesi ile açıklanabilir. Silis dumanı betonda kullanıldığında, çimentonun hidrasyonu esnasında ortaya çıkan serbest kireci bağlayarak kalsiyum silikat hidrateyi (CSH) oluşturur. Serbest kirecin bağlanması neticesinde çimento hamuru daha yoğun mikro boşluk yapısına sahip olur, ayrıca ince silis dumanı taneleri agrega-çimento hamuru ara yüzeyini sıkılayıp güçlendirerek daha yüksek dayanımlara ulaşabilen betonlar elde edilmesini sağlar [18,16,17]. Silis dumanı betonun erken yaşta yüksek dayanımlara ulaşmasını sağlamakla birlikte, bu durum betonun bulunduğu ortamın sıcaklığıyla da ilişkilidir. Silis dumanı kullanılarak üretilen betonun 7 günlük dayanımında, eğer kür yapıldığı ortam 10°C mertebesinde ise belirgin bir artış olmamaktadır. Ancak kür ortamının sıcaklığı 20°C mertebesinde ise, betonun dayanımı önemli ölçüde artmaktadır [19]. Silis dumanının betonun erken dayanımını arttırması, özellikle prekast ve öngerilmeli beton yapımında büyük fayda sağlamaktadır [16]. Silis dumanının kullanımı toplam bağlayıcı miktarının azalmasına da imkân verebilmektedir. Uzun vadede ise silis dumanı betonun dayanımını önemli ölçüde arttırır ve 120 MPa değerlerinde dayanımlara ulaşılmasına olanak verir [17].

### **1.4.3.3 Silis Dumanının Betonun Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi**

Silis dumanının betonda geçirimsizliği azaltması ve zararlı kimyasalların penetrasyonunu yavaşlatması sebebiyle durabilitenin ön plana çıktığı durumlarda tercih edilmektedir. Betonda geçirimsizlik, silis dumanı kullanıldığında da bileşenlerin özelliklerine, yerleştirme koşulları ve bakım gibi koşullarla ilişkilidir. Silis dumanı çimento hamurlardaki gözenekleri doldurmak sureti ile azaltarak geçirimsizliği azaltmaktadır. Silis dumanının geçirimsizlik yönünden etkinlik faktörü, basınç dayanımı için elde edilen etkinlik faktöründen daha fazladır ve bu olumlu etki düşük dozlu betonlarda daha fazla gözlemlenmektedir [16].

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 klor geçirimsizliği

görülmektedir. Bu durum özellikle silis dumanı oranı arttıkça kendini daha da göstermektedir. Bu nedenle silis dumanı oranı arttırıldıkça, kür koşullarına daha çok özen gösterilmelidir.

**Tablo 1.4 :** Betonların Klorür Geçirgenliğine Silis Dumanının Etkisi [16].

Beton Türü	Klorür Geçirgenliği	Elektrik yükü (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

ASTM C1202 '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. Silis dumanını katkılı betonlarda yapılan ASTM 1202 Hızlı klor geçirimliliği deney sonuçlarında ortalama 500 coulomb değerlerinin altında sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu değer ASTM C1202 standardında belirtilen çok düşük klor geçirimliliği sınıfına girmektedir [16,19]. Tablo 1.4'de Beton karışımındaki silis dumanı oranının klorür geçirimliliğine etkisi verilmiştir.

## 2. BETONA GÖMÜLÜ ÇELİKTE KOROZYON

Korozyon, metallerin çevresel etkenler sonucunda girdikleri bir elektrokimyasal reaksiyon sonucu aşınmaya uğrayarak niteliklerini kaybetmesi olarak tanımlanabilir [20]. Betonarme yapılarda kullanılan demirler nemli ortamlarda ya da su etkisi karşısında oldukça dayanıksızdır. Betonun yüksek alkali özelliği ve atmosferden beton içerisine oksijen difüzyon hızının da oldukça düşük olması nedeniyle, normal koşullar altında betonarme demirlerinin korozyona uğramadığı kabul edilir. Betonun içerisindeki alkali ortam, betonarme demirlerinin üzerinde bir oksit tabakası oluşup, anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına neden olur. Bu olaya alkali pasivasyon adı verilir. Bu durum neticesinde, normal şartlar altında, normal bir betonda oksit filmi bozulmadan çeliğin korozyonu uzun bir süre önlenmiş olur [17,21].

Çeşitli çevresel kaynaklardan betonun içerisine klorür iyonunun difüzyonu durumunda, betonarme demirlerinin pasiflik hali bozulur. Klorür iyonunun betona difüzyonu ise suda çözülmüş olarak gerçekleşir. Betona su içerisinde çözülmüş olarak giren tuz suyun buharlaşmasının ardından beton boşluklarında kalır ve gittikçe derişik hale gelir [17,21].

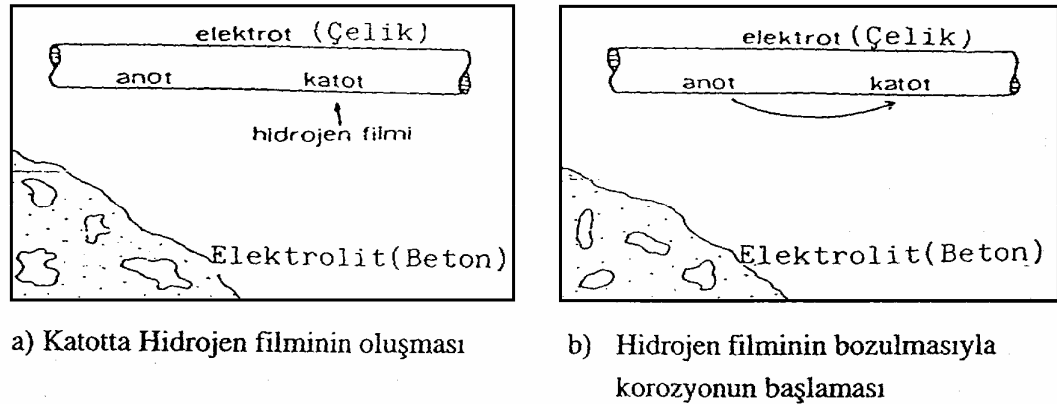
Beton içerisindeki çeliğin korozyonu elektro-kimyasal bir süreç olarak açıklanabilmektedir. Betonun içerisindeki çeliğin yüzeyinde meydana gelen değişik elektro-kimyasal potansiyellere sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin meydana getirdiği elektrolit ile birleşir, betonarme çeliğinin kendisi ise elektronları ileten elektronik iletken durumunda olur. Dışardan beslenen bir akım olmadığı durumlarda, korozyonun bir süreklilik arz edebilmesi için elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir [17,21].

Betonarme yapılarda, demirin korozyona uğraması durumunda meydana gelen tek olumsuz sonuç, donatının korozyon sonucunda çürüyerek, kesitinin azalması değildir. Demirin paslanması ile birlikte hacimsel bir büyüme meydana gelir. Bu

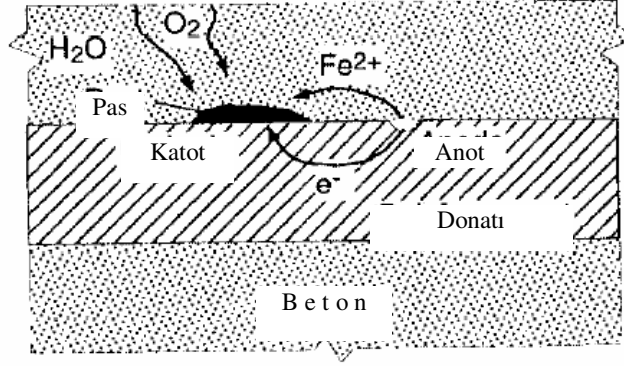
hacim artışı neticesinde, betonda iç gerilmeler meydana gelir ve bu durum sonucunda betonda çatlaklar oluşur ve hatta parçalanabilir. Bu durum bütün yapı için tamir edilmesi mümkün olmayan çok tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir [17,21].

## 2.1 Çeliğin Beton İçerisindeki Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması

Korozyon, metal-elektrolit ara yüzeyinde elektron transferi vasıtası ile yürümektedir. Heterojen yapı ve kuvvetli bir elektrolit olarak kabul edilmiş olan betonarme çeliğinin yüzeyinde birbirine çok yakın olmak üzere Şekil 2.1'de görüldüğü gibi anodik ve katodik olarak farklı potansiyel değerlerinde alanlar meydana gelir. Bunun nedeni ise betonun genel olarak homojen olmayan yapısı neticesinde farklı bölgelerde, farklı değerlerde oksijen ve klor difüzyonunun meydana gelmesi ve bunların konsantrasyonunun betonarme çeliği boyunca farklı değerler almasıdır. Klor difüzyonunun yüksek olduğu bölgelerde donatı çubuğu anot ve bu bölgenin hemen bitiminde katot olarak fonksiyonunu devam ettirir. Oluşan potansiyel farkları nedeniyle, Betonun yapısındaki boşluklardan içeri giren oksijen katodik bölgede indirgenirken betonarme çeliğinin yüzeyinde elektronlar koparak Şekil 2.2'de görüldüğü gibi pozitif değere sahip kısımlardan potansiyelin negatif değer aldığı kısımlara doğru hareket eder. Potansiyeli pozitif olan alanlar anot, potansiyeli negatif olan alanlara katot olarak davranış gösterirler [17,21,22].



Şekil 2.1 : Çeliğin Beton İçindeki Korozyonunun Elektrokimyasal Mekanizması [21]



**Şekil 2.2 :** Donatının Anot Kısımındaki Demirin Çözünüp Katotta Pas Oluşturması [23].

Betona gömülü donatıda korozyon oluşumu esnasında meydana gelen anodik reaksiyonlar (2.1a-d)'de ve katodik reaksiyonlar (2.2a-b)'de verilmiştir.

Anot reaksiyonları;



Katot reaksiyonları;



Bu reaksiyonlar sonucunda, katotta açığa çıkan hidroksil, anot reaksiyonlarından açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek önce ferrohidroksite (2.3), ardından daha kararlı haldeki ferrikhidroksite (2.4) dönüşür [17,21].



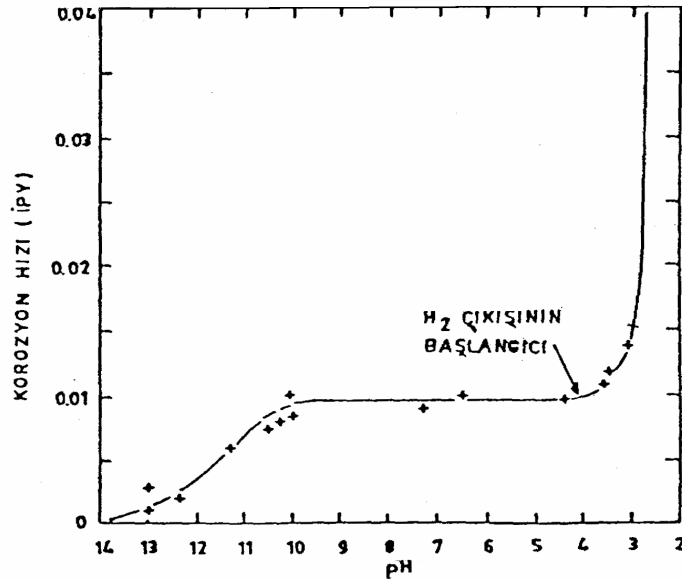
Sonuç olarak betonun içerisindeki çelikte korozyon meydana gelebilmesi için öncelikle karbonatlaşma veya ortamda klorür varlığı sonucunda pasivasyon tabakasının yok olması gerekmektedir. Bu durum meydana geldiğinde

- Ortamın nemli olması
- Ortamda oksijen bulunması gerekmektedir.

Eğer bu üç durumdan biri olmazsa donatıda korozyon meydana gelmez [23].

### 2.1.1 Betonun Alkalitesi

Betonun Ph seviyesinin artması ile birlikte betonarme çeliğinin yüzeyindeki koruyucu tabakanın oluşması kolaylaşır. Betonda pH seviyesi 12-13 değerlerinde olduğunda çelik pasif bölgede bulunur, başka bir deyişle korozyona uğramaz. Şekil 2.3'de betonarme çeliğinin korozyonunun hızının, betonun pH'ına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir [17].



Şekil 2.3 : Betonarme Çeliğinde Korozyon Hızı İle pH Arasındaki İlişki [21].

## 2.2 Betona Gömülü Çeliğin Korozyonuna Etki Eden Faktörler

### 2.2.1 Karbonatlaşma Etkisi

Betonun alkalitesinin sağlayan, hidrate olmuş çimentoda bulunan  $\text{Ca(OH)}_2$  zamanla havadaki  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonata ( $\text{CaCO}_3$ )'a dönüşür ve bu durum ortamın pH'ının azalmasına sebep olur. Alkalitenin ana kaynağı olan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in özelliğini kaybetmesiyle birlikte çelik üzerindeki pasif tabakanın varlığını sağlayan ortam kaybolmuş olur ve böylelikle donatı korozyonu başlar [17].

### 2.2.2 Klorür Etkisi

Betonarme çeliğinin korozyonuna neden olan en önemli faktörlerden birisi de betonda klorür iyonlarının bulunmasıdır. Beton içindeki klorür iyonları çelik üzerindeki koruyucu pasif tabakaya zarar vererek korozyona neden olur. Betona klorür iyonları difüzyonla girebileceği gibi, bazı durumlarda betonun yapımı sırasında kullanılan malzemelerden de girebilmektedir. Özellikle denizden alınan kumun, gerekli işlemlerden geçirilmeden kullanılması,  $\text{Cl}^-$  içeren priz hızlandırıcı katkı maddelerin kullanılması gibi durumlarda, betona klorür iyonu girebilmektedir.

Klorür iyonlarının kaynağı ne olursa olsun, beton içerisindeki çeliğe ulaşacak ve korozyona sebep olacaktır. Beton içerisinde bulunan klorür iyonlarını tamamı serbest halde değildir. Klorür iyonlarından bir kısmı çimento hidratları vasıtası ile absorbe edilir. Ancak absorbe edilmeyen klorür iyonları serbest kalır ve betonarme yapılarda büyük tahribata neden olmaktadır.

Betonun içerisinde bulunmasına izin verilen değerler standartlarda belirtilmiştir. Bu standartlardan bazıları Tablo 2.1'de gösterilmiştir [17].

**Tablo 2.1 : Betonda İzin Verilen Klorür Değerleri [17].**

Standart	Beton Özellikleri	Çimento Ağırlığına Oranı	Agrega Ağırlığına Oranı
BS 8110	Öngerilmeli Beton	0,1	-
	Sülfata Dayanıklı Çimento ile Üretilmiş Beton	0,2	-
	Normal Portland Çimentosu ve Katkılı Portland Çimentoları ile Üretilmiş Beton	0,4	-
	Öngerilmeli Beton	0,06	-
ACI 318	Servis Ömrü Boyunca Cl <sup>-</sup> ye Maruz Beton	0,15	-
	Servis Ömrü Boyunca Kuru olan ya da Nemden Korunmuş Beton	1,00	-
	Diğer Betonarme Yapılardaki Beton	0,30	-
TSE 706	Öngerilmeli Beton	-	0,02

### 2.2.3 Betonun Özdirenci

Betonun içerisindeki donatının korozyona uğraması için pasivasyon tabakası zarar gördükten sonra, katodik reaksiyon meydana gelmesi için oksijenin bulunması gerekliliğinden bahsedilmiştir. Korozyonun meydana gelmesi için ayrıca betonun içerisine penetre eden klorür iyonlarının da anodik bölge ile katodik bölge arasında hareketi gerekmektedir ki; bu da betonun özdirencine bağlıdır. Elektriksel direnç de betondaki boşluk yapısıyla ilişkilidir.

Betonun özdirencinin ölçülmesi yarı hücre deneyi ile birlikte yapıldığında çok daha yararlıdır. Bu şekilde yapılan ölçümlerde donatı korozyonunun hızı hakkında tahmin yapılabilmektedir. Yarı hücre okumaları neticesinde donatıda aktif korozyon olsa dahi, eğer betonun özdirenci yüksek ise, korozyon hızının düşük olduğu sonucuna varılabilir. Betonun özdirenci çimento hamurundaki kılcal boşlukların azalmasıyla artmaktadır. Bu durum betonun özellikle korozif ortamlarda kullanılması durumunda, servis ömrünü tamamlayabilmesi için yüksek kalitede üretilmesinin önemini ortaya koymaktadır [23]. Tablo 2.2’de betonun özdirenci ile korozyon riski arasındaki ilişki verilmiştir.



**Tablo 2.2 :** Betonun Özdirenci İle Korozyon Riski Arasındaki İlişki [23].

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

### 2.3 Korozyon Ölçüm Yöntemleri

Betonarme yapılarda korozyon nedeniyle oluşan hasarların ortadan kaldırılması oldukça zor ve maliyetlidir. Bu durum betonarme yapılarda korozyonun önceden tespitinin önemini ortaya koymaktadır. Donatı korozyonunun ölçümünde gözlemsel metotlar, ağırlık kaybına dayalı ölçümler kullanıldığı gibi korozyon potansiyeli ölçümü, AC Empedans tekniği ve lineer polarizasyon tekniği gibi elektrokimyasal ölçüm teknikleri de kullanılabilir [21].

#### 2.3.1 Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Ölçümü)

Yarı hücre potansiyel ölçümü yöntemi gerek laboratuarda, gerekse yerinde donatının elektriksel yarı hücre potansiyelinin belirlenmesini amaçlaya, kolay ve hızlı bir elektrokimyasal korozyon izleme yöntemidir. Betonun yüzeyinde pas lekeleri, çatlaklar, parçalanmalar gibi gözle görülür belirtiler meydana gelmeden önce beton içerisindeki donatının korozyon aktivitesinin izlenmesine olanak sağlar ve böylelikle donatı korozyonu tehlike oluşturacak seviyelere gelmeden önlem alma imkanı verir [24].

Bu deney yönteminde akımı düşük tutmak amacı ile iç direnci en az 10M $\Omega$  olan bir voltmetre donatı çeliği ile referans elektrod arasına konulur. Voltmetrenin pozitif ucu donatı çeliğine, diğer ucu ise içerisinde elektrod olan Şekil 2.4'deki gibi yarı hücreye bağlanır. Elektrod olarak bakır-bakır sülfat, Kalomel ve hidrojen elektrodu kullanılabilir. Yarı hücre ile beton arasına elektriksel iletkenliği arttırmak amacı ile

ıslak sünger yerleştirilir. Düzenekteki voltmetreden potansiyel değeri okunur. Eğer çelikte korozyon varsa, çelikten kopan serbest elektronlar donatıdan yarı hücreye doğru hareket etmek isteyecektir. Voltmetre uçlarının yarı hücreye ve donatıya bağlanmasındaki kutup değerleri nedeniyle voltmetrede negatif değer okunacaktır. Okunan negatif değer artması, mevcut olan serbest elektronun fazlalığını, dolayısı ile donatıdaki korozyon seviyesinin fazlalığını gösterecektir.

Yarı hücre potansiyeli deneyinde okunan değerler donatının bakır bakır sülfat çözeltisinin hemen altındaki bölümü için geçerlidir [22,25,23].

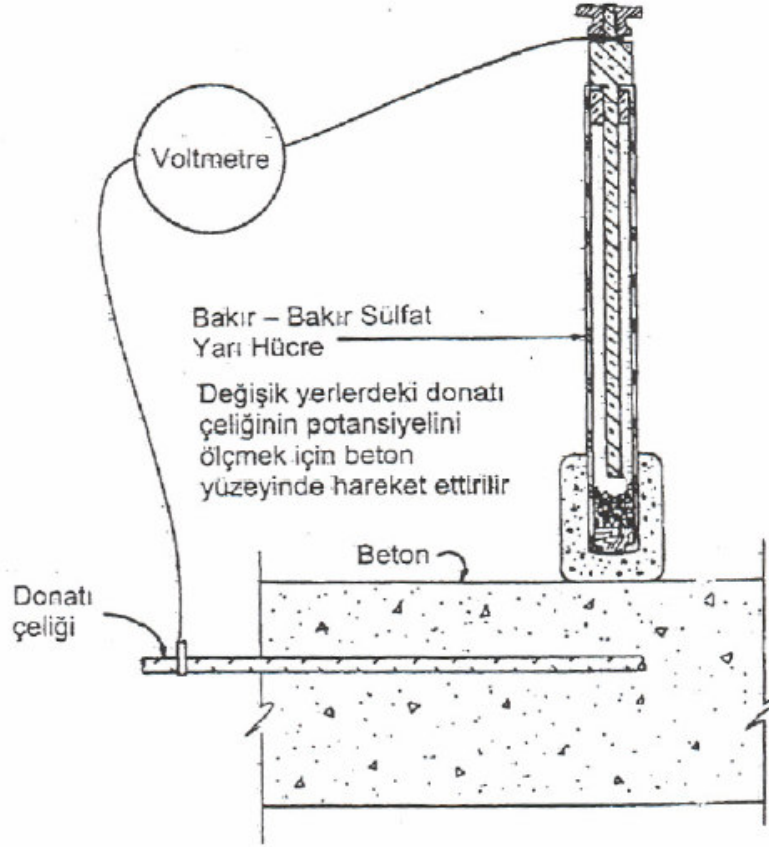
Beton yüzeyi ile donatı arasındaki kalınlığı yani beton örtüsünü dikkate almayan bu deney metodu betonun herhangi bir servis süresinde kullanılabilir [17].

Yarı hücre potansiyeli deneyinde çoğunlukla kullanılan birkaç referans elektrotlarıyla yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde esas alınan ölçütler Tablo 2.3'de verilmiştir.

**Tablo 2.3 :** Korozyon Potansiyelinin Belirlenmesinde Kullanılan Referans Elektrod Değerleriyle Korozyon Riski Arasındaki İlişki [24].

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

Şekil 2.4'de Bakır-Bakırsülfat Yarı Hücre Devresi ile yapılan korozyon potansiyeli ölçümü deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 2.4 : Bakır-Bakırsülfat Yarı Hücre Devresi [25].

### 2.3.2 AC Empedans Yöntemi

AC Empedans tekniği ile korozyon ölçümünde alternatif akım kullanılarak çok düşük frekanslarda ölçümler gerçekleştirmeye olanak sağlar. 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 değerde 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. Empedans ölçüm tekniğinde kullanılan düzenek çok karmaşık, maliyeti oldukça yüksek ve arazi şartlarına uygun değildir. Bu nedenle Lineer polarizasyon tekniği AC empedans tekniğine göre düşük maliyeti ve arazide ölçüme imkan sağlaması sebebiyle ön plana çıkmaktadır [24].

### 2.3.3 Lineer Polarizasyon Yöntemi

Betonun içerisindeki donatının korozyonunun ölçülmesinde kullanılan lineer polarizasyon tekniğinde 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  $\pm 10$  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 türevi, polarizasyon direnci ( $R_p$ ) olarak tanımlanmıştır. 1957 yılında Stern-Geary bağıntısı yardımıyla bu değer korozyon akımı ile ilişkilendirilmiştir [24,21]. Şekil 2.5’de verilen grafikte görüldüğü gibi  $\pm 10$  mV potansiyel aralığı dikkate alındığında (2.5),(2.6) ve (2.7) de verilen eşitlikler kullanılarak polarizasyon direnci ( $R_p$ ) ve korozyon akım yoğunluğu değerleri hesaplanabilir.

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (2.5)$$

$$B = (\beta_a \cdot \beta_c) / 2,3(\beta_a + \beta_c) \quad (2.6)$$

$$i_{corr} = B / (R_p \cdot A_k) \quad (2.7)$$

Burada;

$\Delta E$  : Polarizasyon değişimi

$\Delta I$  : Akım değişimi

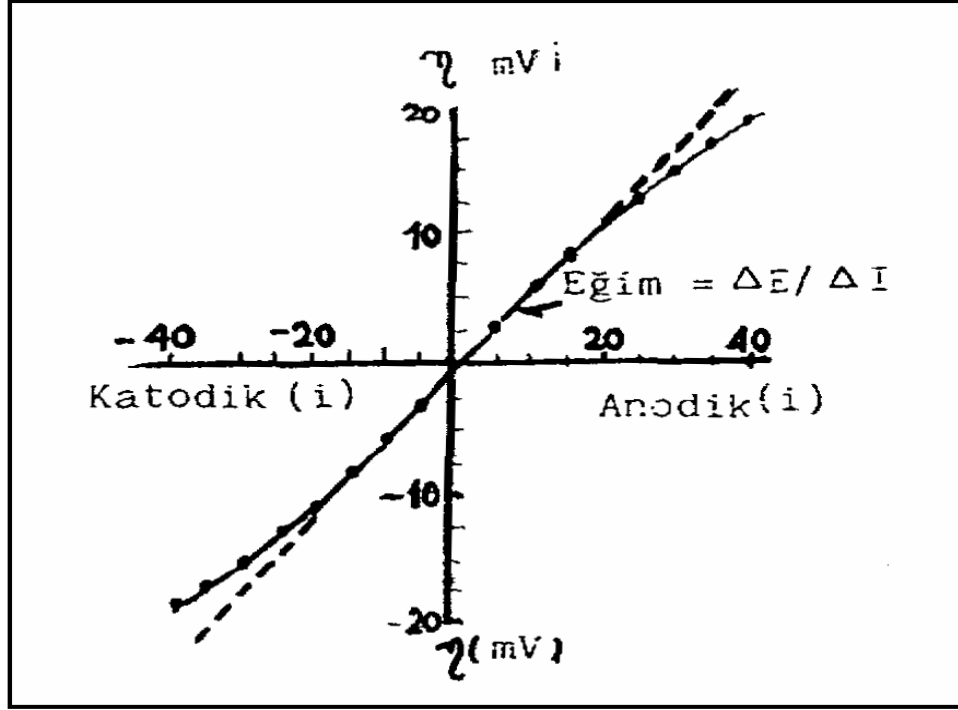
$\beta_a$  : anodik tafel sabiti

$\beta_c$  : katodik tafel sabiti

$B$  : Orantı katsayısı (aktif paslanan çelikte 26 mV, pasif çelikte 52 mV)

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

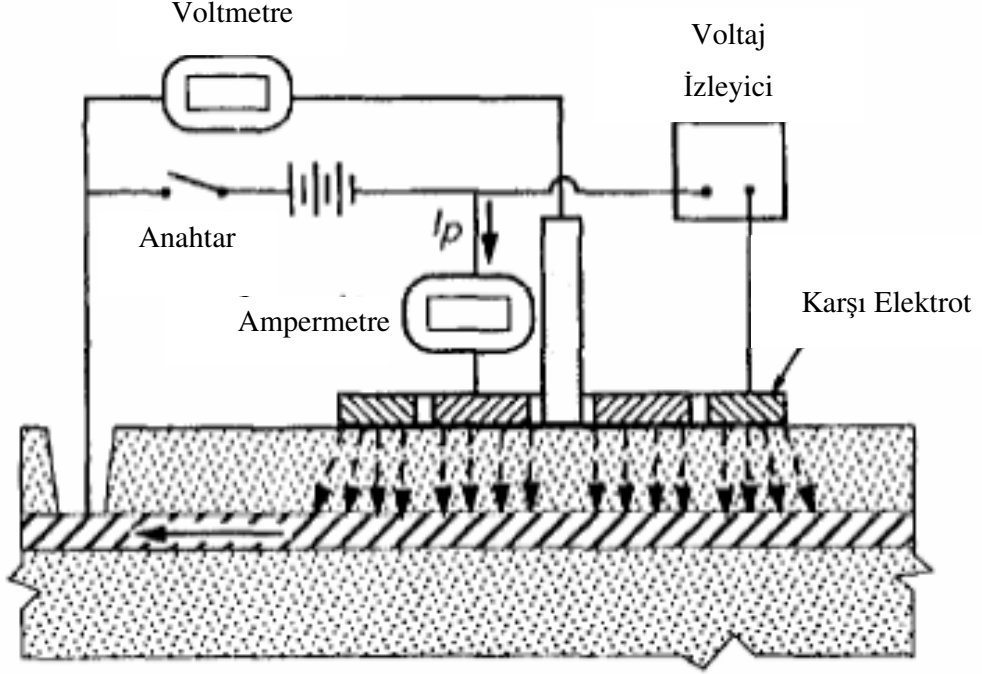
$A_k$ : Donatının aktif olarak korozyona uğradığı alan.



Şekil 2.5 : Dış Akıma Karşı Polarizasyon Aşırı Gerilimi [21].

Linear polarizasyon ölçümü için şekil 2.6'da gösterilen düzenek kullanılmaktadır. Bu düzenekte üç elektrod yer almaktadır. Bu elektrodlardan ilki yarı hücre elektrodu, ikincisi çalışan elektrod olarak adlandırılan donatı çeliği, Üçüncü elektrod ise donatıya polarizasyon sağlayan karşı elektrottur [23].

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 düzlek 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 [23].



**Şekil 2.6 :** Lineer Polarizasyon Ölçümünde Kullanılan Deney Düzenegi [23].

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen korozyon akım yoğunluklarının irdelenmesi için kullanılan değerler Tablo 2.4’de verilmiştir [23].

**Tablo 2.4 :** Korozyon Akım Yoğunluğuna Göre Korozyon Durumu [23].

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

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışması kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Su/bağlayıcı alt ve üst sınır değerleri 0.48-0.58, bağlayıcı dozaj alt ve üst sınır değerleri  $300\text{kg/m}^3$ - $400\text{kg/m}^3$  ve silis dumanı/bağlayıcı alt ve üst sınır değerleri 0,03-0,15 olarak ön üretimlerle belirlendikten sonra Merkezi Karma Tasarım yöntemi (MKTY) kullanılarak 20 farklı karışım oranı elde edilmiş ve buna göre üretim yapılmıştır. Üretim aşamasında akışkanlığın belli değerler arasında kalmasını sağlamak için her üretimde farklı miktarlarda akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

#### 3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

##### 3.1.1 Agregalar

Uygun karışımın sağlanması için agregaların özgül ağırlıkları bulundu, İri agrega için 3 kg, ince agrega için 1 kg olmak üzere agrega örneği elek serisinden elendi. Elekten yüzde geçen değerler hesaplandı. Sonuçlar grafik üzerinde gösterilerek granülometri eğrisi çizildi.

**Tablo 3.1 :** Deneysel Çalışmada Kullanılan Agregaların Özgül Ağırlıkları.

Doğal Kum ( $\text{g/cm}^3$ )	:	2,65
Kırmataş kumu ( $\text{g/cm}^3$ )	:	2,7
Kırmataş I ( $\text{g/cm}^3$ )	:	2,71
Kırmataş II ( $\text{g/cm}^3$ )	:	2,72

Tez çalışması süresince üretimi yapılan betonlarda kırmataş-II, kırmataş-I, doğal kum ve kırma taş kumu kullanılmıştır. Kullanılan agregaların özgül ağırlıkları Tablo 3.1'de , granülometri deneyi sonuçları Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4, Tablo 3.5 'de verilmiştir.

**Tablo 3.2 : Doğal Kum İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları**

Elek Ebadı (mm)	W Her Elek Üzerinde Kalan (gr)	Wy Kümülatif Ağırlık (gr)	Elekten Geçen (gr)	Geçen (%)
31,5	0		1000	100
16	0	0	1000	100
8	0	0	1000	100
4	40,1	40,1	959,9	95,99
2	146,5	186,6	813,4	81,34
1	189,1	375,7	624,3	62,43
0,5	233,3	609	391	39,1
0,25	263,2	872,2	127,8	12,78
Tepside Kalan	116,9	989,1		

**Tablo 3.3 : Kırmataş Kumu İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları**

Elek Ebadı (mm)	W Her Elek Üzerinde Kalan (gr)	Wy Kümülatif Ağırlık (gr)	Elekten Geçen (gr)	Geçen (%)
31,5	0		1000	100
16	0	0	1000	100
8	0	0	1000	100
4	3,3	3,3	996,7	99,67
2	168,4	171,7	828,3	82,83
1	263,4	435,1	564,9	56,49
0,5	218,1	653,2	346,8	34,68
0,25	126,1	779,3	220,7	22,07
Tepside Kalan	211,5	990,8		

**Tablo 3.4 : Kırmataş-I İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları**

Elek Ebadı (mm)	W Her Elek Üzerinde Kalan (gr)	Wy Kümülatif Ağırlık (gr)	Elekten Geçen (gr)	Geçen (%)
31,5	0		3000	100
16	0	0	3000	100
8	1255,1	1255,1	1744,9	58,16333
4	1533,7	2788,8	211,2	7,04
2	190,8	2994,6	20,4	0,68
1	0	2994,6	0	0
0,5	0	2994,6	0	0
0,25	0	2994,6	0	0
Tepside Kalan	0	2994,6		



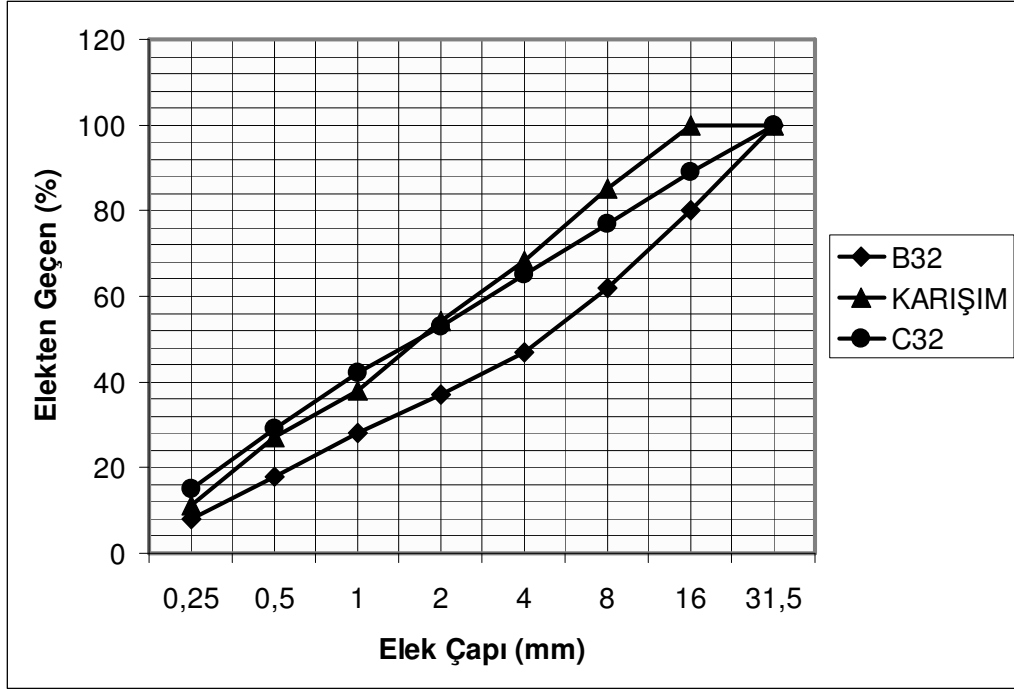
**Tablo 3.5 : Kırmataş-II İle Yapılan Granülometri Deneyi Sonuçları**

Elek Ebadı (mm)	W Her Elek Üzerinde Kalan (gr)	Wy Kümülatif Ağırlık (gr)	Elekten Geçen (gr)	Geçen (%)
31,5	0		3000	100
16	908,8	908,8	2091,2	69,70667
8	2069	2977,8	22,2	0,74
4	15	2992,8	7,2	0,24
2	0	2992,8	7,2	0,24
1	0	2992,8	0	0
0,5	0	2992,8	0	0
0,25	0	2992,8	0	0
Tepside Kalan	0	2992,8		

Yapılan elek analizi sonucunda elde edilen değerlerden faydalanılarak agrega granülometreleri belirlenmiştir. Buna göre beton karışım hesapları yapılırken kullanılacak granülometri oranları Tablo 3.6’da verilmiştir. agregaların 0,22’si doğal kum, 0,23’ü kırmataş kumu, 0,21’i kırmataş I, 0,34’ü kırmataş II olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.1’de üretimde kullanılan agregaların granülometri eğrisi görülmektedir.

**Tablo 3.6 : Beton Karışımında Kullanılan Agrega Oranları**

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



Şekil 3.1 : Beton Üretiminde Kullanılan Agregaların Granülometri Eğrisi

### 3.1.2 Çimento

Yapılan Çalışmada Akçansa fabrikalarında TS 19'a uygun olarak üretilmiş PÇ 42,5 Normal Portland Çimentosu kullanılmıştır. Öncelikle kullanılan çimentonun özgül ağırlığı belirlenmiştir. 100,00 gr tartılmış çimento, belli bir seviye çizgisine kadar benzinle doldurulmuş hacim ölçerin içine boşaltılmıştır. Benzinin çimento eklendikten sonraki yüksekliği okunmuş ve böylelikle çimentonun gerçek hacmi  $\text{cm}^3$  cinsinden bulunmuştur. Bu değer kullanılarak çimentonun özgül ağırlığı hesaplanmıştır. Deney ile bulunan çimentonun özgül ağırlık değeri ve üreticiden alınan diğer fiziksel özellikleri, kimyasal özellikleri ve basınç dayanımları sırasıyla Tablo 3.7, Tablo 3.8 ve Tablo 3.9'da verilmiştir [4].

**Tablo 3.7 : Portland Çimentosunun Fiziksel Özellikleri.**

Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	: 3,15
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	: 3683
45 µ elek üzeri (%)	: 7,9
90 µ elek üzeri (%)	: 0,6
Su / Çimento (%)	: 50
Priz başı (dk)	: 142
Priz sonu (dk)	: 191
Le Chatelier (mm)	: 1

**Tablo 3.8 : Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri.**

Toplam SiO <sub>2</sub> (%)	: 20,14
Çözünmeyen Kalıntı (%)	: 0,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	: 5,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	: 3,78
CaO (%)	: 63,92
MgO (%)	: 1,35
SO <sub>3</sub> (%)	: 2,84
K <sub>2</sub> O (%)	: 0,84
Kızdırma Kaybı (%)	: 1,35
Tayin Edilemeyen (%)	: 0,47
S. CaO (%)	: 1,35
Klorür (%)	: 0,0407

**Tablo 3.9: Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı.**

Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	
2 Gün	: 26,8
7 Gün	: 39,4
28 Gün	: 52,1

### 3.1.3 Silis Dumanı

Literatür çalışması bölümünde detaylı olarak anlatılan silis dumanı, çimento ile ikameli olarak karışıma dahil edilmiştir. Belirlenen alt ve üst sınır değerlere göre farklı oranlarda silis dumanı içeren beton karışımları elde edilmiştir. Bu karışım oranları kullanılarak silis dumanının değişen oranlarda çimento ile ikamesi sonucunda, betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerine etkisini tespit etmek amacıyla 20 farklı beton üretilmiştir. Beton üretiminde kullanılan silis dumanının analiz sonuçları Tablo 3.10'da verilmiştir.

**Tablo 3.10:** Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.

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

### 3.1.4 Akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Beton üretimleri sırasında su ihtiyacını yüksek oranda azaltan, prefabrik beton ve hazır beton endüstrisi için geliştirilmiş, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde başarılı sonuçlar veren 3.nesil bir süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi olan ve SİKA firması tarafından üretilen, Viscocrete-5W isimli, modifiye edilmiş polikarboksilat esaslı, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan, mükemmel yüzey görünümü elde etmek için kullanılan klor içermeyen akışkanlaştırıcı beton katkı maddesi kullanılmıştır. Tablo 3.11'de kullanılan süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler verilmiştir.

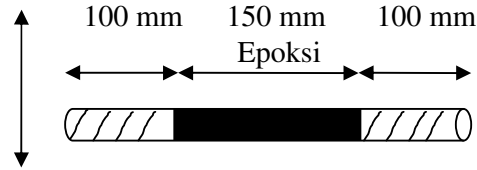
**Tablo 3.11:** Kullanılan Süper Akışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri.

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

### 3.1.5 Donatı Çeliği

Korozyon ölçümü için kullanılacak lolipop numunelerin içerisine yerleştirilecek 10 mm kesitli nervürlü çelikler 30 cm uzunluğunda kesildi. Daha sonra, çeliklerin

betona saplanacağı bölümün dış etkenlerden korunması amacıyla şekil 3.2 de görüldüğü gibi, baştan ve sondan 100 mm'lik kısmı PVC streç film ile kaplandıktan sonra ortadaki 150 mm'lik kısım Sikadur-330 Epoksi Reçinesi ile kaplanmıştır. Epoksinin sertleşmesinin ardından PVC streç film çıkartılmıştır.



**Şekil 3.2 : Donatının Epoksi İle Kaplanması.**

### 3.2 Merkezi Karma Tasarım Yöntemi

Betonların karışım oranlarının belirlenmesinde Merkezi Karma Tasarım (MKT) yöntemi kullanılmıştır. MKT metodunda, merkezi x,y,z koordinat sistemlerinin 0,0,0 koordinatları olan bir küp oluşturulur. Her koordinat sistemi farklı bir değişken için kullanılır. Bu koordinat sistemlerinde  $\pm 1$  değerleri küpün eksenleri kestiği oransal değerlerdir. Sözü edilen  $\pm 1$  değerleri hesaplanırken örneğin  $i=3$  bağımsız değişken için  $2^i=8$  farklı karışım değeri elde edilir. Bu 8 farklı karışım, alt ve üst limit değerleri kullanılarak ortaya çıkan karışımlardır. Ayrıca alt ve üst limitlerin dışında kalan durumları da belirlemek amacıyla karışım oranları belirlenirken bir parametreyi limit değerlerinin  $\pm \alpha$  değeri kadar altındaki ve üstündeki değerlerde kullanırken diğer parametrelerin ordinat merkezindeki değerleri (ortalamaları) kullanılır. Bahsi geçen  $\alpha$  değeri bu deneysel çalışmada 1,68179 olarak kullanılmıştır. Örnek olarak bir değişken için alt limit 10 üst limit 20 olduğunda, bu limit değerlerinin ortalaması 15 olmaktadır. Her iki değer in ortalamaya olan uzaklıkları 5'dir. Kullanılan  $\alpha$  değeri (1,68179) ortalamaya olan uzaklık olan 5 ile çarpılırsa 8,4 değeri elde edilmektedir. Bu durumda ortalama değeri 15'e 8,4 eklenecek ve üst limitin üzerinde kullanılacak değer olan 23,4 bulunacak ve 15'den 8,4 çıkartılarak alt limitin altında kullanılacak değer olan 6,6 bulunacaktır. Bu çalışmada 3 farklı sayısal değişken kullanıldığından  $2^i=6$  farklı karışım da, parametrelerin  $\pm \alpha$ 'daki değerleri

kullanılmıştır. Deney sonuçlarındaki hata derecesini belirlemek amacıyla sadece koordinat merkezindeki değerleri (ortalamaları) kullanarak 6 adet aynı karışım oranı verir. Böylelikle 20 farklı karışım oranı elde edilmiştir.

### 3.3 Beton Karışımları

Merkezi Karma Tasarım Yöntemi kullanılarak 20 farklı karışım oranı elde edilmiştir. TS 802 Beton Karışım Hesaplarına uygun olarak yapılan ön üretimler sonucunda tasarım için kullanılacak alt ve üst limit değerleri belirlenmiş ve bu değerler Tablo 3.12’de verilmiştir [26] .

**Tablo 3.12:** Betonlar İçin 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

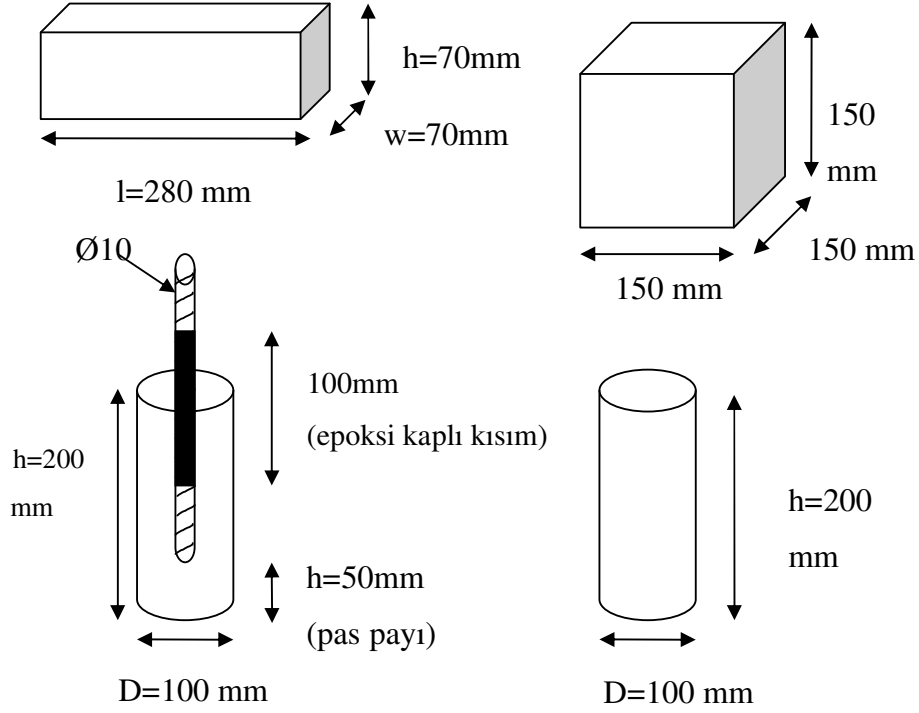
Tablo 3.12’deki değerler kullanılarak Tablo 3.13’de verilen karışımlar hazırlanmıştır. Üretilen 20 farklı betonun kodlamasında ilk bölüm beton karışım numarasını açıklamaktadır. S harfi ise silis dumanı kullanılarak üretildiğini belirtmek amacıyla her numune kodunun başında kullanılmıştır. Kodlamanın ikinci bölümü kür koşulunu temsil etmektedir. Burada H hava kürünü, S su kürünü temsil etmektedir. Kodlama da son olarak numunenin konulduğu kalıbı ve bu kalıptaki kaçınıcı numune olduğunu göstermektedir. Kalıp türünü belirtirken, P prizma kalıpları, S silindir kalıpları, K küp kalıpları, D ise 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. Tablo 3.13’de üretilen 20 adet karışımın açılımları, katkı miktarları gösterilmiştir.

**Tablo 3.13:** Beton Karışım Oranları.

Numune No	Toplam Bağlayıcı	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 klorür geçirimsizliği deneyinde kullanılmak ve biri havada biri suda kür edilmek üzere 2 adet silindir, basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılmak üzere ve üçü havada üçü suda kür edilmek üzere 6 adet küp, kılcılık deneyinde kullanılmak ve biri havada biri suda kür edilmek üzere 2 adet prizma ve 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. Numunelerin boyutları Şekil 3.3’de verilmiştir.



**Şekil 3.3:** Numune Şekilleri ve Boyutları.

Beton karışımının hazırlanmasının ardından boyutları belli olan hazır yağlanmış kalıplara dökülür. Su kaybını en aza indirmek amacıyla kalıpların üzeri örtülür ve bir gün süreyle kalıpta bekletilir. Üretilen betonlara havada ve suda olmak üzere iki farklı koşulda kür uygulanmıştır. Kalıplardan çıkarılan numunelerden hava kürü uygulanacak olanlar, önceden hazırlanmış bölümlere yerleştirilmiş, su kürü uygulanacaklar ise, içerisinde karma suyuyla aynı niteliklere sahip olan  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de su ile dolu havuza yerleştirilmiştir. Üretilen numunelerin tamamına kür işlemi uygulanmıştır. İzlenen kür programının çerçevesinde numuneler 90 gün süreyle bu koşullarında saklanmıştır.

### 3.4 Taze Beton Deneyleri

#### 3.4.1 Çökme (Slump) Deneyi

Bu deney TS EN 12350-2' de tanımlandığı şekilde yapılır. Çökme deneyi için üst çapı 10 cm, alt çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan bir kesik koni, Abrams konisi kullanılır. Koni, düz ve su emmeyen bir yüzeye oturtularak üç eşit yükseklikte tabakalar halinde taze betonla doldurulur. Her tabaka, çapı 16 mm olan özel deney



çubuğu ile 25 kez şişlenerek sıkıştırılır. Kalıp tamamen doldurularak üzeri mala ile düzeltilir. Daha sonra kalıp bekletilmeden kulplarından tutularak yavaşça ve sarsılmadan kaldırıldığında taze betonun kendi ağırlığı etkisiyle yaptığı çökme gözlenir. Numunede yıkılma olmaksızın, koni çıkartıldıktan itibaren betonun çöktüğü miktar, karışım kıvamının ölçütü olarak değerlendirilir.[4]. Üretilen her betonun çökme değeri belirlenmiş ve akışkanlaştırıcı kullanılarak bu değerin 12 cm ile 18 cm arasında kalması sağlanmıştır.

### **3.4.2 Birim Ağırlık Deneyi**

Üretilen betonlar kalıplara yerleştirilmeden önce, silindir şeklinde hacmi bilinen bir kap içerisine yerleştirilerek taze beton birim ağırlığı bulunmuştur.

### **3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri**

Beton karışımı hazırlandıktan sonra boyutları belli olan hazır kalıplara döküldü. Su kaybını en aza indirmek amacıyla üzeri örtüldü ve bir gün süreyle kalıpta bırakıldı. Daha sonra kalıplardan çıkarılan numuneler, önceden belirlenmiş kür ortamına göre havada ya da içerisinde beton karma suyuyla aynı niteliklere sahip olan su ile dolu havuza yerleştirilmiştir.

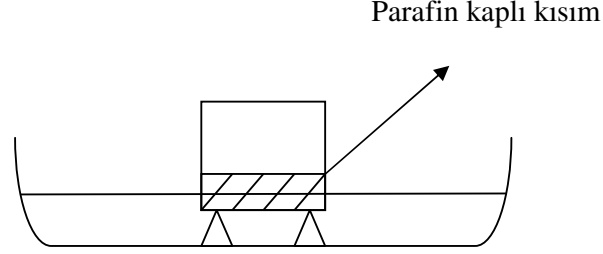
#### **3.5.1 Basınç Deneyi**

İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda 3000 kN'luk ALŞA presi kullanılarak yapılan deneyde, 150x150x150 mm boyutlarında, 90 gün 20°C ±2°C'lik su havuzunda bekletilmiş numuneler ve havada bekletilmiş numuneler alınmış ve tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır.

#### **3.5.2 Kılcal Su Emme Deneyi**

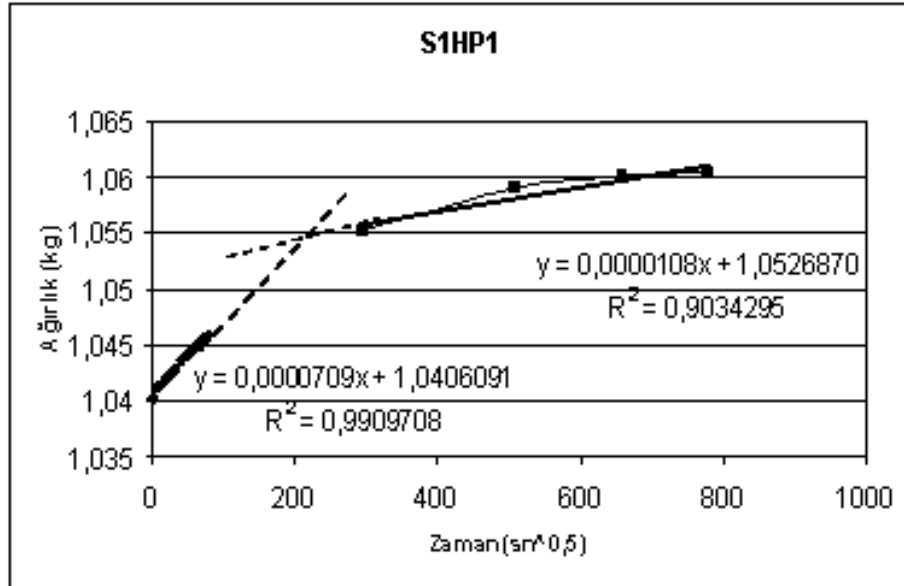
Betonun kılcal su emmesinin tayini için prizma şeklindeki kalıplara yerleştirilen beton numuneler kullanılmıştır. 90 gün olarak belirlenen kür süresinin sonuna gelindiğinde, numuneler şekil 3.4'de görüldüğü gibi üç parça olacak şekilde kesici ile kesilmiş, ardından 70°C'lik etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kuruması sağlanmıştır. Numunelerin su yüzüne deyen yüzeyi haricindeki yüzeylerinden su emmesini önlemek için parafinle kaplanır ve kuru ağırlığı belirlenir. Daha sonra şekil

3.4’de görüldüğü gibi numunenin bir yüzü su ile temas edecek şekilde tepsiye yerleştirilmiş ve belirli aralıklarla ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetinde elektronik terazi ile ölçülmüştür.



Şekil 3.4 : Kılcal Su Emme Deney Düzenegi

Elde edilen sonuçlar ilk gün ve bundan sonraki bir hafta olmak üzere iki zaman aralığına göre sınıflandırılarak Şekil 3.5’deki gibi bir grafik oluşturulmuştur. Ağırlık değişimi ile zaman arasındaki değişimi gösteren eğriler için eğilim çizgileri eklenmiş ve bu doğruların denklemleri birbirine eşitlenerek yatay eksendeki kesişimin değeri olan bir  $t_n$  (Kırılma Zamanı) bulunmuştur. Bu  $t_n$  değeri ve bu değere karşılık gelen  $Q_n$  (Ağırlık) değeri kullanılarak kılcallık katsayısı ( $k$ ), Penetrasyon direnci değeri ( $m$ ) ve etkin porozite değeri ( $\epsilon_c$ ) hesaplanmıştır.



Şekil 3.5 : Kılcal Geçirimsizlik Değerlerinin Hesaplanmasında Kullanılan Grafik

### 3.5.3 Hızlı Klorür Geçirirliği Deneyi (ASTM 1202-97)

ASTM 1202-97 standardına göre yapılan hızlı klorür geirirliği deneyi için, 100 mm çapında, 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler kullanılmıştır. Kr süresi olan 90 gün dolduğunda, numunelerin üst ve alt kısımlarından 20'şer mm kesildikten sonra 3 eşit parçaya kesilerek kalınlıkları 50 mm çapları 100 mm olan üç adet silindir elde edilmiş oldu. Kesim işleminin ardından numunelerin etrafı elektrik akımının geçmesini önlemek amasıyla sikaflex-PRO 3 WF Poliüretan mastik ile kaplanmıştır. Daha sonra vakum haznesine konulan numuneler 3 saat süre ile 1 mm Hg den daha düşük basıncın altında bekletildikten sonra haznenin içerisine mevcut basınc değişmeden saf su dolduruldu ve 1 saat süre ile bu şekilde vakum işlemine devam edildi. Vakumlama işleminin ardından numuneler  $18\pm 2$  saat süre ile saf suda bekletildi. Deney için hücrelere yerleştirilen numunelerin etraflarına, çözeltilerin sızmasının engellenmesi için çabuk kuruyan silikon sürüldü. Silikonun kurumasının ardından hücrelerin birine %3'lk NaCl zeltisi, diğerine 0.3N NaOH zeltisi dolduruldu ve 60 voltluk gerilim uygulandı. Düzeneğe akım verilmesi ile birlikte ilk ölçüm yapıldı ve 6 saat süre ile her 30 dakikada bir devreden geçen akım ölçüldü. Ölçülen amper değerleri coulomb'a dönüştürülerek sonuçlar elde edilmiştir [11].

### 3.5.4 Lineer Polarizasyon, Yarı hücre ve özdirenç lm

Korozyon lmleri 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 doygun bakır/bakır Sülfat zeltisi içeren aparatı kullanılırken, korozyon potansiyeli ölçümleri ve betonun özdirencinin ölçülmesinde, içerisinde bakır çubuk ve haznesinde doygun bakır/bakır sülfat çözeltisi bulunan diğer bir aparat kullanılmıştır. Bu deneyler için hazırlanan içine donatı gömülü beton numuneler, doksan günlük hava ve su krnn ardından 1 molar NaCl çözeltisine konulmuş ve bu andan itibaren dönüşümlü olarak yedi gün NaCl çözeltisinde, yedi gün havada bekletilmiştir. lm esnasında her iki apart ile beton arasına nemlendirilmış sünger konulmuş ve cihazın üretici firması tarafından hazırlanan prosedür çerçevesinde ölçümler yapılarak cihazın hafızasına kaydedilmiştir. Yapılan ölçümlerden elde edilen verilen bilgisayar ortamına aktarılmış ve sonuçlar grafiklere aktarılmıştır.



**Şekil 3.6 :** Korozyon Ölçümlerinde Kullanılan Gecor 8 Cihazı

## 4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1 Taze Beton Deneyleri Sonuçları

Taze beton deneylerinin sonuçları Tablo 4.1 verilmiştir. Taze beton deneylerinde çökmenin 12 ile 18 cm arasında kalmasını sağlamak için, kullanılan akışkanlaştırıcının üretici firmasının izin verdiği sınır değerler içerisinde kalmak şartıyla değişik oranlarda akışkanlaştırıcı oranları kullanılmıştır.

**Tablo 4.1 :** Taze Beton Deneylerinde Elde Edilen Sonuçlar ve Kullanılan Akışkanlaştırıcı Oranları

Karışım No	Taze Beton Birim ağırlığı (g/dm <sup>3</sup> )	Çökme (cm)	Akışkanlaştırıcı/ Toplam Bağlayıcı (%)
S1	2,383	16,0	0,6
S2	2,433	17,0	1,4
S3	2,318	13,0	0,2
S4	2,393	12,0	0,3
S5	2,374	16,0	0,9
S6	2,393	16,0	1,1
S7	2,334	13,0	0,2
S8	2,317	18,0	0,0
S9	2,304	16,5	0,2
S10	2,372	18,5	0,9
S11	2,449	17,0	1,7
S12	2,402	13,0	0,8
S13	2,453	16,0	2,0
S14	2,443	18,5	2,2
S15	2,385	12,0	0,3
S16	2,384	14,0	0,6
S17	2,380	15,0	0,6
S18	2,394	14,5	0,6
S19	2,378	16,0	0,6
S20	2,375	16,0	0,6

## 4.2 Sertleşmiş Beton DeneYeri Sonuçları

### 4.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

90 gün boyunca hava kürü ve su kürü olmak üzere iki farklı koşulda bekletilen beton numunelerinin basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar,hava kürleri için Tablo 4.2'de, su kürleri için Tablo 4.3'de verilmiştir.

**Tablo 4.2 :** Betonların Basınç Dayanımları (Hava Kürleri)

Karışım No	Basınç Mukavemeti (MPa)			
	1 no'lu numune	2 no'lu numune	3 no'lu numune	Ortalama
S1	54,7	49,6	55,2	53,2
S2	61,4	57,8	60,7	60,0
S3	53,6	54,6	57,6	55,2
S4	45,6	45,7	46,2	45,9
S5	56,2	49,4	53,8	53,1
S6	50,0	44,1	45,0	46,4
S7	40,5	44,8	47,1	44,2
S8	41,6	39,1	42,2	41,0
S9	46,3	48,3	44,3	46,3
S10	53,9	49,4	55,8	53,0
S11	51,0	50,6	50,8	50,8
S12	46,9	47,1	45,9	46,6
S13	48,1	48,6	45,5	47,4
S14	47,0	49,1	48,2	48,1
S15	54,6	56,3	55,2	55,4
S16	54,0	53,5	49,4	52,3
S17	50,8	48,9	49,4	49,7
S18	56,5	54,6	54,5	55,2
S19	53,5	53,2	51,7	52,8
S20	49,8	51,5	48,7	50,0

**Tablo 4.3 : Betonların Basınç Dayanımları (Su Kürleri)**

Karışım No	Basınç Mukavemeti (MPa)			
	1 no'lu numune	2 no'lu numune	3 no'lu numune	Ortalama
S1	61,3	58,2	62,2	60,6
S2	60,3	61,2	60,8	60,8
S3	64,7	66,1	64,1	65,0
S4	49,6	48,0	50,0	49,3
S5	60,0	59,6	56,2	58,6
S6	51,4	51,7	51,5	51,6
S7	48,1	52,2	56,7	52,3
S8	44,2	48,3	45,6	46,0
S9	53,3	47,3	54,4	51,7
S10	64,2	69,3	67,8	67,1
S11	53,3	52,2	52,9	52,8
S12	48,1	48,2	48,7	48,3
S13	53,2	51,1	52,2	52,2
S14	53,5	54,6	53,8	54,0
S15	69,7	68,8	58	65,5
S16	57,0	55,1	57,8	56,6
S17	57,5	60,2	56,9	58,2
S18	63,5	58,5	64,6	62,2
S19	53,5	56,2	55,6	55,1
S20	56,5	58,8	57,8	57,7

#### 4.2.2 Geçirimlilik Deneyleri Sonuçları

##### 4.2.2.1 Kılcal Su Emme Deney Sonuçları

Sertleşmiş beton numunelerinde yapılan kılcallık deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, kılcallık katsayısı (k), etkin porozite katsayısı ( $\epsilon_e$ ) ve penetrasyon direnci katsayısı (m) hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar sonucunda elde edilen değerler Tablo 4.4'de verilmiştir.

**Tablo 4.4 : Kılcal Su Emme Deneylelerinden Elde Edilen Sonuçlar**

Karışım No	Etkin Porozite ( $\epsilon_e$ ) (kg/dm <sup>3</sup> )		Kılcallık Katsayısı (k) (kg/m <sup>2</sup> .√sn)		Penetrasyon Direnci (m) (sn/m <sup>2</sup> )	
	Hava Kuru	Su Kuru	Hava Kuru	Su Kuru	Hava Kuru	Su Kuru
S1	0,032	0,012	0,0148	0,0082	4771536	2104508
S2	0,017	0,007	0,0084	0,0047	4112277	2034392
S3	0,055	0,020	0,0244	0,0132	5036494	2248548
S4	0,061	0,033	0,0225	0,0143	7409344	5260174
S5	0,026	0,011	0,0127	0,0082	4145380	1859779
S6	0,026	0,009	0,0120	0,0057	4616838	2453137
S7	0,062	0,020	0,0234	0,0130	7085055	2484130
S8	0,109	0,048	0,0386	0,0226	7910751	4611260
S9	0,071	0,022	0,0311	0,0145	5204843	2254935
S10	0,023	0,01	0,0108	0,0065	4646062	2442186
S11	0,023	0,009	0,0098	0,0047	5381207	3452619
S12	0,037	0,019	0,0140	0,0095	7077055	4078150
S13	0,017	0,011	0,0077	0,0059	4794411	3558447
S14	0,012	0,009	0,0064	0,0048	3726463	3319412
S15	0,038	0,014	0,0165	0,0083	5263874	2817679
S16	0,030	0,008	0,0136	0,0062	4836977	1639650
S17	0,031	0,007	0,0143	0,0050	4647461	2102500
S18	0,036	0,007	0,0146	0,0047	6070531	2416095
S19	0,033	0,008	0,0170	0,0082	3789668	2467264
S20	0,031	0,009	0,0137	0,0105	5085244	2116886

#### 4.2.2.2 Hızlı Klorür Geirirnililiği Deney Sonuçları

90 günlük kür sonucunda 10x20 cm'lik silindir numuneler üzerinde yapılan hızlı klorür geirirnililiği deneylerinde elde edilen yük değerleri Tablo 4.5'de verilmiştir.



**Tablo 4.5 : Hızlı Klorür Geçirirmliliği Deneyi Sonuçları**

Karışım No	Klorür Geçirirmliliği (coulomb)							
	Hava Kürü				Su Kürü			
	1 no'lu Numune	2 no'lu Numune	3 no'lu Numune	Ortalama	1 no'lu Numune	2 no'lu Numune	3 no'lu Numune	Ortalama
S1	1037	1111	1161	1037	392	405	397	392
S2	305	329	245	293	233	255	235	241
S3	1916	2032	1974	1974	636	588	612	612
S4	4978	6520	7475	6324	2769	3294	3212	3092
S5	546	446	495	496	213	194	203	203
S6	971	941	956	956	279	283	281	281
S7	3221	3283	3945	3483	716	693	705	705
S8	7436	8783	8108	8109	2829	3145	3274	3083
S9	2576	2751	2444	2591	365	343	451	386
S10	931	946	1213	1030	190	180	185	185
S11	467	437	628	511	363	435	451	416
S12	2772	3916	4747	3812	857	860	859	859
S13	1242	1019	1220	1160	835	828	832	832
S14	379	386	384	383	213	212	213	213
S15	3273	3574	3349	3399	1453	1344	1444	1413
S16	812	810	814	812	586	555	518	586
S17	815	805	810	810	545	560	560	555
S18	822	821	799	814	511	519	524	518
S19	1095	1100	1138	1111	401	411	403	405
S20	1150	1159	1171	1161	395	401	395	397

### 4.3 İstatistiksel Değerlendirmeler

Tez çalışmasında üretilen beton numuneleriyle yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarla istatistiksel çalışmalar yapılmıştır. Her deneyde hava kürü ve su kürü için olmak üzere iki farklı fonksiyon oluşturulmuş ve ardından değişkenlerin farklı değerleri için elde edilmesi beklenen 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 yaklaştığını 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 0,05'den küçük olan değişkenler ise fonksiyonun sonucunda daha etkin olan değişkenlerdir.

#### 4.3.1 Basınç Dayanımları

Elde edilen basınç dayanımları analiz edilmiş ve üç boyutlu grafiklerde farklı oranlarda silis dumanının betona katılmasıyla, basınç dayanımında meydana gelen değişiklikler izlenmiştir. Yapılan istatistiksel çalışma sonucunda merkezi karma tasarım yönteminde kullanılan değişkenler ile hava kürleri ve su kürleri için iki ayrı fonksiyon oluşturulmuştur. Basınç dayanımları için oluşturulan fonksiyon denklem (4.1)'de verilmiştir. Yapılan istatistiksel çalışmanın değerleri Tablo 4.6'da, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1 \times (TB) + a_2 \times (SD/TB) + a_3 \times (S/TB) + a_4 \times (TB)^2 + a_5 \times (SD/TB)^2 + a_6 \times (S/TB)^2 \quad (4.1)$$

**Tablo 4.6 :** Basınç Dayanımları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri

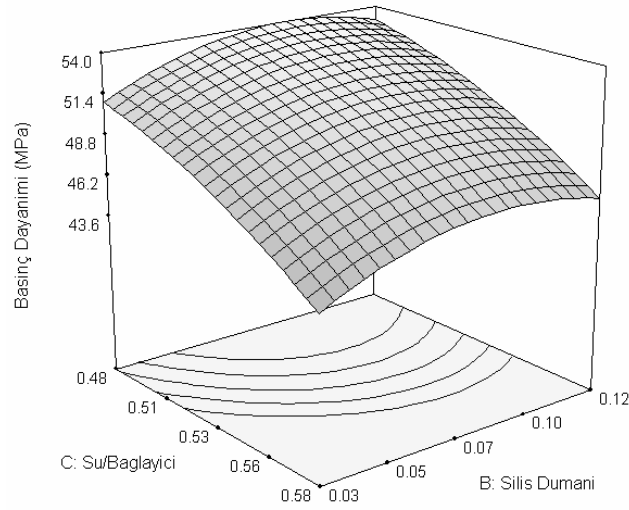
Kür Türü	r <sup>2</sup>	Ortalama	σ	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,6521	50,45	3,35	6,64
Suda	0,7090	55,65	3,69	6,62

Tablo 4.7'deki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hava kürleri numuneleri için oluşturulan fonksiyonda su/toplam bağlayıcı ve (silis dumanı/toplam bağlayıcı)<sup>2</sup> değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kürü numuneleri için oluşturulan denklemde ise toplam bağlayıcı, silis dumanı/toplam bağlayıcı, su/bağlayıcı ve (silis dumanı / toplam bağlayıcı)<sup>2</sup> değişkenlerinin fonksiyon sonucu üzerinde etkili oldukları anlaşılmaktadır.

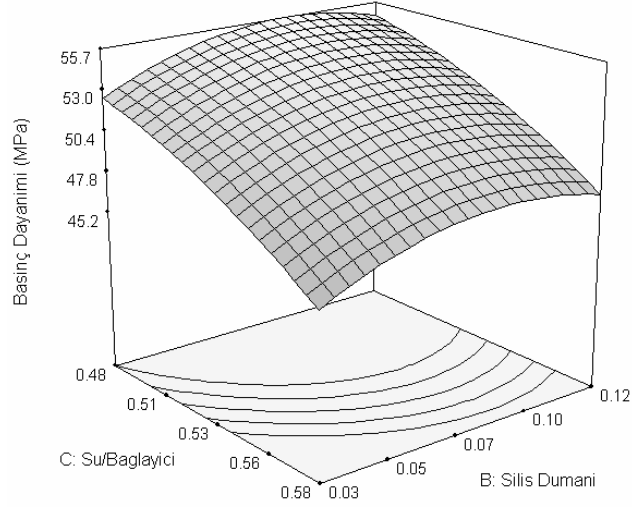
**Tablo 4.7 :** Basınç Dayanımları İçin Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları Ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri

Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü
	a <sub>0</sub>	-52,158	-130,050				
Toplam Bağlayıcı	a <sub>1</sub>	0,183	0,225	1,371	5,296	0,2626	0,0386
Silis Dumanı / Toplam Bağ.	a <sub>2</sub>	160,736	243,308	1,515	9,290	0,2402	0,0093
Su / Toplam Bağ.	a <sub>3</sub>	307,521	550,984	16,353	9,462	0,0014	0,0088
(Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	a <sub>4</sub>	-0,0002	-0,00026	0,431	0,431	0,5225	0,5226
(Silis D./ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	a <sub>5</sub>	-906,247	-1171,520	4,323	5,966	0,058	0,0296
(Su/ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	a <sub>6</sub>	-359,293	-577,704	1,035	2,211	0,3274	0,1609
Oluşturulan Model				4,062	5,279	0,0163	0,0059

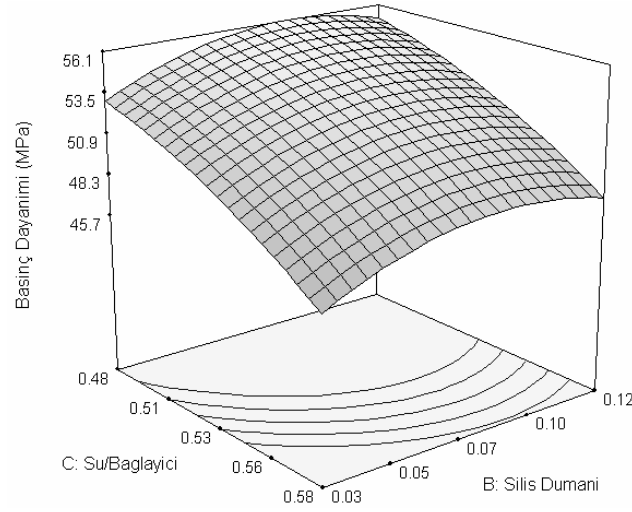
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de hava kürü uygulanmış beton numunelerinin basınç dayanımlarındaki değişiklikler gösterilmiştir.



**Şekil 4.1 :** Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi

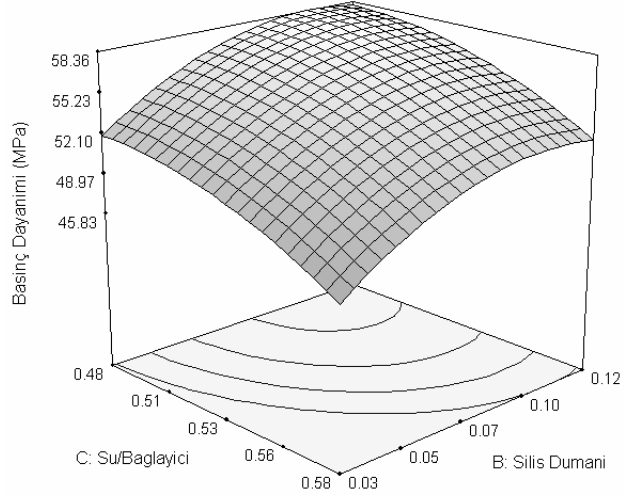


**Şekil 4.2 :** Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi

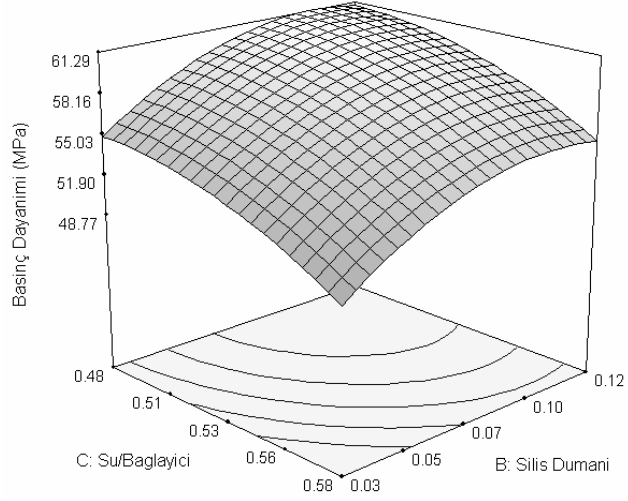


**Şekil 4.3 :** Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi

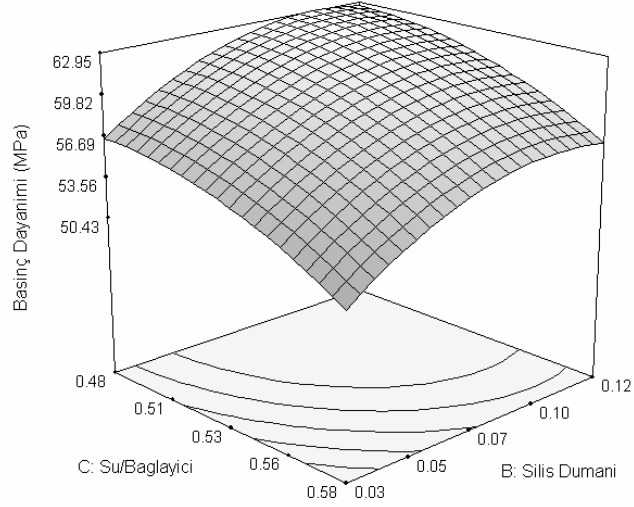
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de görüldüğü gibi 300,350 ve 400 dozlu betonların hepsinde su/bağlayıcı oranının düşmesiyle birlikte basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Su/bağlayıcı artması ve silis dumanının azalmasıyla birlikte, basınç dayanımında da düşme görülmüştür. Ancak silis dumanı oranının artmasıyla birlikte bir noktadan sonra dayanımda düşme görülmüştür.



**Şekil 4.4 :** Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



**Şekil 4.5 :** Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



**Şekil 4.6 :** Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi

Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da su kürü uygulanmış beton numunelerinin basınç dayanımlarındaki değişiklikler gösterilmiştir. Su kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımları hava kürü uygulanmış numunelerde olduğu gibi su/bağlayıcı oranının düşmesiyle birlikte artış göstermiştir.. Hava kürü uygulanmış numunelerde, silis dumanının artmasıyla birlikte dayanımda gözlemlenen azalma, su kürü uygulanmış numunelerde daha yüksek silis dumanı oranlarında görülmüştür. Bu durum silis dumanı kullanılarak üretilen betonlarda kürün önemini göstermektedir.

### 4.3.2 Durabilite Deneyleri

#### 4.3.2.1 Kılcal Su Emme Deneş Sonuçları

Yapılan istatistiksel çalışma sonucunda merkezi karma tasarım yönteminde kullanılan değişkenler ile hava kürleri ve su kürleri için iki ayrı fonksiyon oluşturulmuştur. Kılcallık katsayıları için oluşturulan fonksiyon denklem (4.2)’de verilmiştir. Yapılan istatistiksel çalışmanın değerleri Tablo 4.8’de, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 Y = & a_0 + a_1 \times (TB) + a_2 \times (SD/TB) + a_3 \times (S/TB) + a_4 \times (TB)^2 + a_5 \times \\
 & (SD/TB)^2 + a_6 \times (S/TB)^2 + a_7 \times (TB) \times (SD/TB) + a_8 \times (TB) \times (S/TB) \\
 & + a_9 \times (TB) \times (S/TB)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

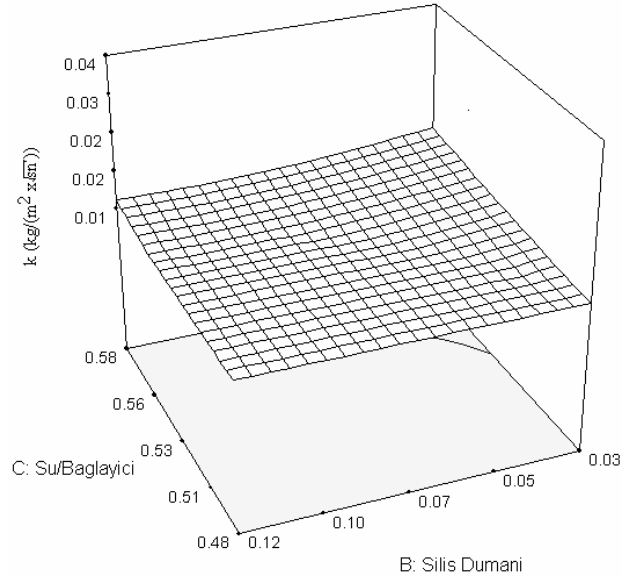
**Tablo 4.8 :** Kılcallık Katsayıları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri

Kür Türü	$r^2$	Ortalama	$\sigma$	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,9569	0,016	0,002306	14,12
Suda	0,9237	0,008935	0,001759	19,68

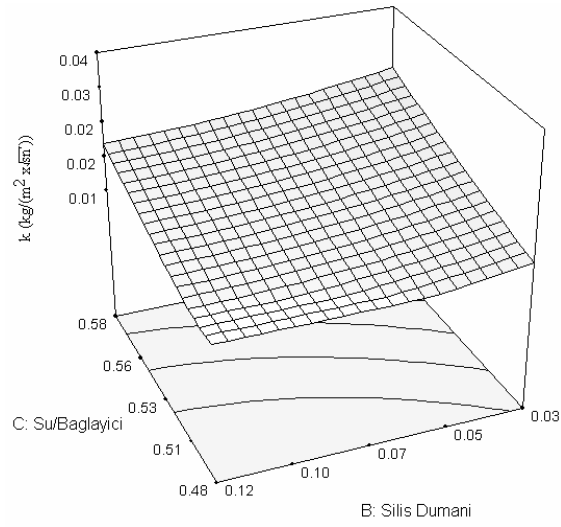
**Tablo 4.9 :** Kılcallık Katsayıları İçin Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri

Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü
	$a_0$	0,277134	0,1956				
Toplam Bağlayıcı	$a_1$	-0,0009	-0,0006	91,146	38,438	0,0001	0,0001
Silis Dumanı / Toplam Bağ.	$a_2$	0,132104	0,2154	14,766	14,865	0,0033	0,0032
Su / Toplam Bağ.	$a_3$	-0,60342	-0,4615	86,878	39,328	0,0001	0,0001
(Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_4$	3,53E-07	0,00001	2,110	1,782	0,177	0,2115
(Silis D./ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_5$	0,505573	0,7069	2,841	9,549	0,1228	0,0114
(Su/ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_6$	0,18324	0,2332	0,569	1,584	0,4681	0,2368
(Top. Bağ.) x (Silis D./ Top. Bağ.)	$a_7$	-0,00054	-0,0003	2,258	1,010	0,1638	0,3385
(Top. Bağ.)x(Su/ Top. Bağ.)	$a_8$	0,00153	0,0009	22,013	12,804	0,0009	0,0050
(Silis D./Top.Bağ.)x (Su/ Top.Bağ.)	$a_9$	-0,13333	-0,500	0,135	3,273	0,7206	0,1005
Oluşturulan Model				24,66	13,454	0,0001	0,0002

Tablo 4.9'daki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hava kürleri numuneleri için oluşturulan fonksiyonda (toplam bağlayıcı), (silis dumanı/toplam bağlayıcı), (su/toplam bağlayıcı) ve ((toplam bağlayıcı) x (su/toplam bağlayıcı)) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kürü numuneleri için oluşturulan denklemde ise (toplam bağlayıcı), (silis dumanı/toplam bağlayıcı), (su/toplam bağlayıcı), (Silis D./ Toplam Bağ.)<sup>2</sup> ve (Top. Bağ.)x(Su/ Top. Bağ.) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları anlaşılmıştır.

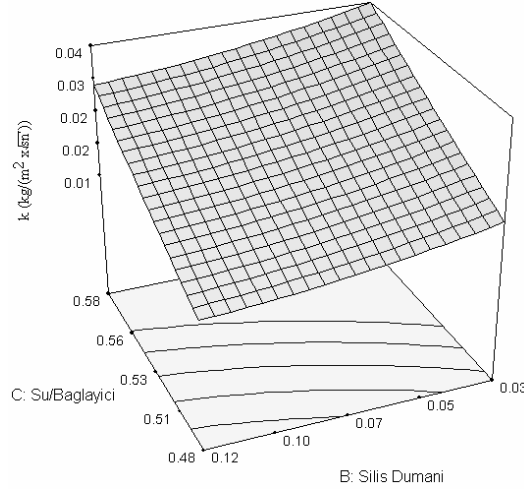


**Şekil 4.7 :** Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



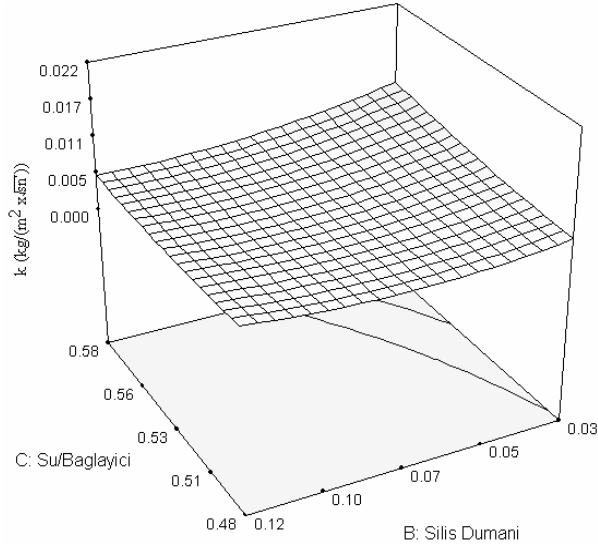
**Şekil 4.8 :** Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



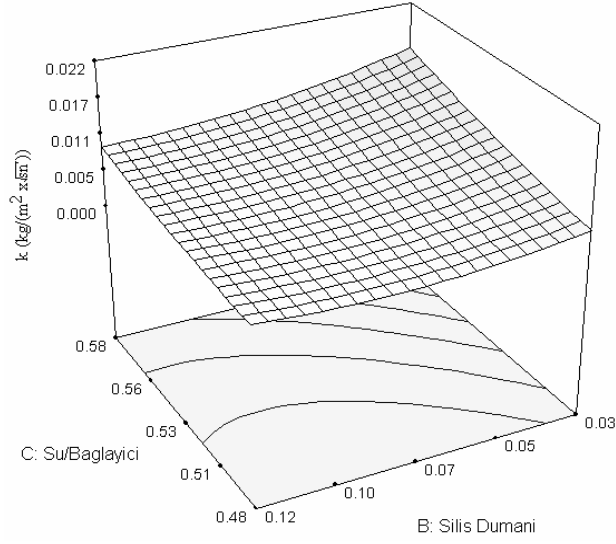


**Şekil 4.9 :** Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi

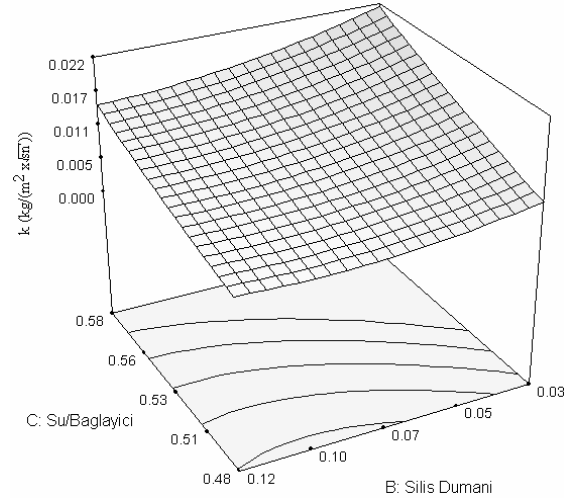
Fagerlund yöntemine göre hesaplanan kılcallık katsayılarının analiz sonucu elde edilen grafikleri Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir. Azalan dozajla birlikte çimento hamurunun boşluk yapısını olumsuz etkisinin de azalmasıyla birlikte geçirimsizlik değerleri düşmüştür. Ayrıca su/bağlayıcı oranının azalması ve silis dumani oranının artmasıyla birlikte geçirimsizlik değerleri de azalmıştır.



**Şekil 4.10 :** Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



**Şekil 4.11** : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



**Şekil 4.12** : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi

Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'deki grafiklerde de görüldüğü gibi su kürü uygulanan beton numunelerinde kürün olumlu etkisi görülmüştür. Azalan dozaj ve artan silis dumani oranı ile birlikte, geçirimsilik değerleri de azalmıştır.

#### 4.3.2.2 Hızlı Klorür Geçirimsiliği Deneyi Sonuçları

Yapılan istatistiksel çalışma sonucunda hızlı klorür geçirimsiliği değerleri kullanılarak hava kürleri ve su kürleri için iki ayrı fonksiyon oluşturulmuştur. Klorür

geçirimsizlikleri için oluşturulan fonksiyon denklem (4.3)'de verilmiştir. Yapılan istatistiksel çalışmanın değerleri Tablo 4.10'da, fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, anlamlılık dereceleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1 \times (TB) + a_2 \times (SD/TB) + a_3 \times (S/TB) + a_4 \times (TB)^2 + a_5 \times (SD/TB)^2 + a_6 \times (S/TB)^2 + a_7 \times (TB) \times (SD/TB) + a_8 \times (TB) \times (S/TB) + a_9 \times (TB) \times (S/TB) \quad (4.3)$$

**Tablo 4.10 :** Klorür Geçirimsizliği Verileri Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri

Kür Türü	$r^2$	Ortalama	$\sigma$	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,9663	2013,28	529,60	26,31
Suda	0,9391	768,63	286,92	37,33

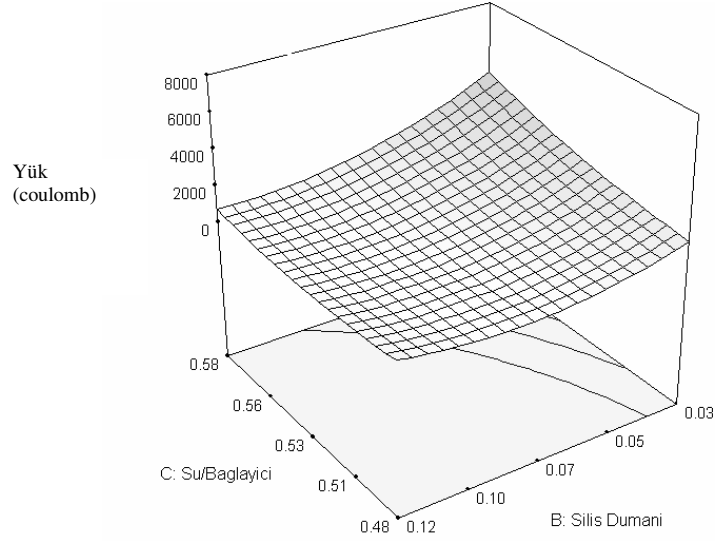
**Tablo 4.11 :** Klorür Geçirimsizliği Sonuçları İçin Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri

Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü
	$a_0$	55790,84	9103,68				
Toplam Bağlayıcı	$a_1$	-99,85	-35,01	33,208	9,180	0.0002	0,0127
Silis Dumani / Toplam Bağ.	$a_2$	131073,91	48045,25	118,682	88,620	0.0001	0,0001
Su / Toplam Bağ.	$a_3$	-187342,3	-21069	57,656	6,714	0.0001	0,0269
(Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_4$	0,07624	0,0058	1,867	0,036	0.2018	0,8523
(Silis D./ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_5$	472562,08	205032,7	47,052	30,177	0.0001	0,0003
(Su/ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_6$	167531,98	-22,92	9,013	0,0001	0.0133	0,9994
(Top.Bağ.) x (Silis D./Top.Bağ.)	$a_7$	-236,33	-151,50	8,065	11,292	0.0176	0,0072
(Top. Bağ.)x(Su/ Top. Bağ.)	$a_8$	152,3	88,75	4,135	4,784	0.0694	0,0536
(Silis D./Top.Bağ.)x(Su/ Top.Bağ.)	$a_9$	-290444,4	-79277,8	12,182	3,092	0.0058	0,1092
Oluşturulan Model				31,850	17,14	0,0001	0,0001

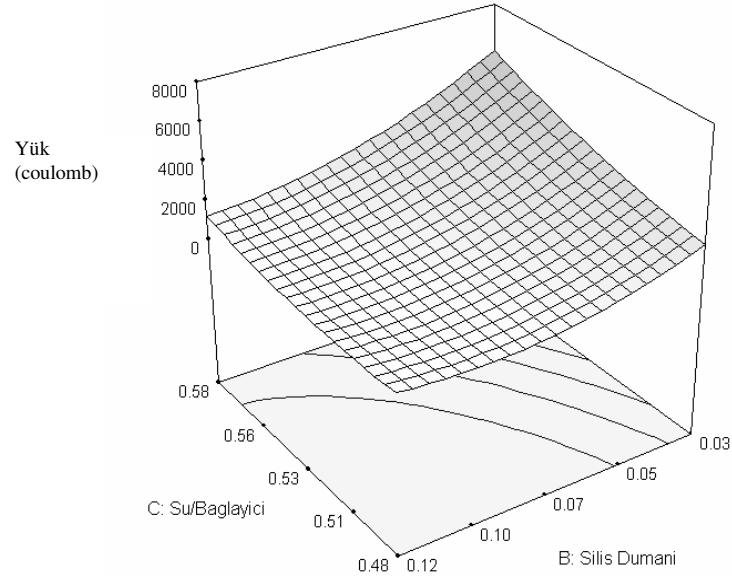
Tablo 4.11'deki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hava kürleri numuneleri için oluşturulan fonksiyonda (toplam bağlayıcı), (silis dumani/toplam

bağlayıcı), (su/toplam bağlayıcı), (Silis dumanı/ Toplam Bağlayıcı)<sup>2</sup>, (Su/ Toplam bağlayıcı)<sup>2</sup>, (Toplam bağlayıcı) x (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı), ((Toplam bağlayıcı) x (su/toplam bağlayıcı)) ve (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı) x (Su/ Toplam bağlayıcı) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kürü numuneleri için oluşturulan denklemde ise (toplam bağlayıcı), (silis dumanı/toplam bağlayıcı), (su/toplam bağlayıcı), (Silis dumanı/ Toplam Bağlayıcı)<sup>2</sup>, (Toplam bağlayıcı) x (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı), ((Toplam bağlayıcı) x (su/toplam bağlayıcı)) ve (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı) x (Su/ Toplam bağlayıcı) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları anlaşılmıştır.

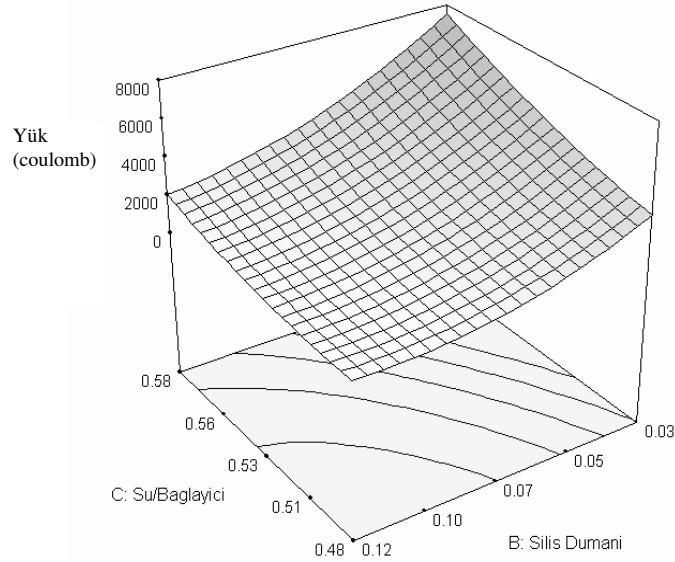
Hızlı klorür deneyi sonuçları kullanılarak yapılan analiz sonucunda değişen silis dumanı, dozaj ve su/bağlayıcı oranları ile hava kürü uygulanmış beton numunelerinin klorür geçirirliliği arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir



**Şekil 4.13 : Hava Kürü uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirirliliği Analizi**



**Şekil 4.14 : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirirliği Analizi**

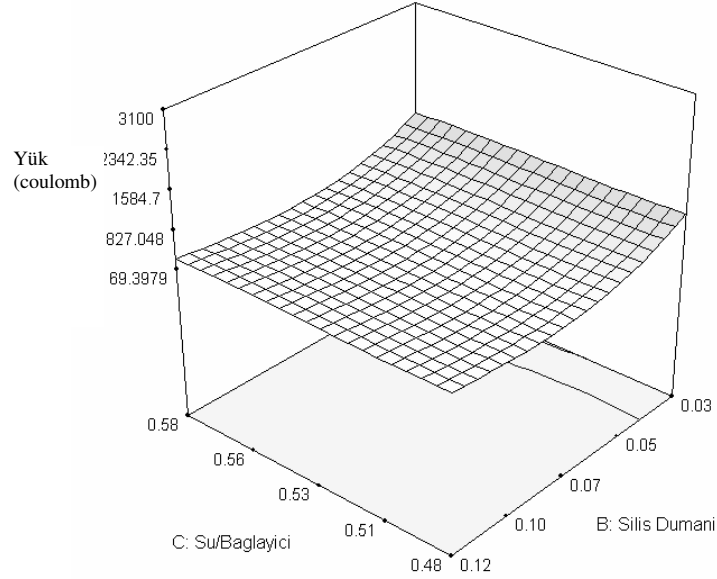


**Şekil 4.15 : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirirliği Analizi**

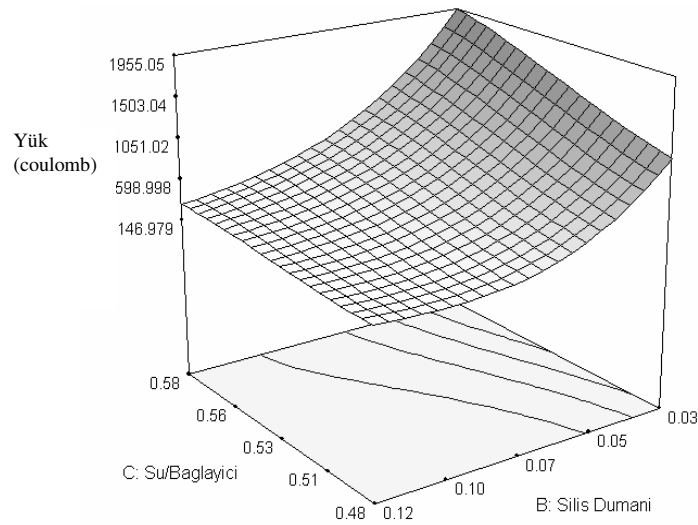
Hava kürüne tabi tutulmuş beton numunelerinin klorür geçirirlilikleri su/bağlayıcı oranının düşmesi ve silis dumani oranının artması ile birlikte belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Hızlı klorür geçirirliliği deneyinde kılcal su emme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Dozajın 400'den 300'e doğru azalmasıyla birlikte geçirirlilik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Geçirirliliğin ana nedeni olarak çimento hamurundaki boşluk yapısı

gösterilmektedir. Dozajın azalmasıyla çimento hamurunun betonun içindeki oranı da azalmaktadır, bu çalışmada düşük dozajlarda geçirimsizlikte olumlu etkiler gözlemlenmiştir.

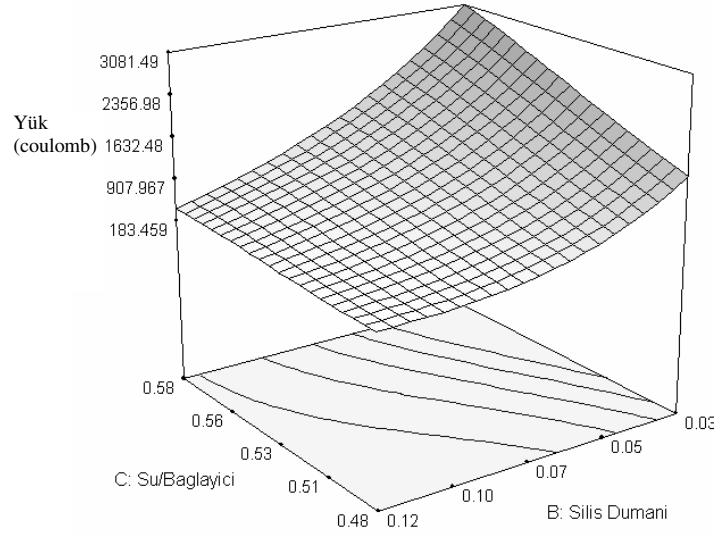
Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de su kürü uygulanmış beton numunelerinin değişen silis dumanı, dozaj ve su/bağlayıcı oranlarıyla klorür geçirimsizlikleri arasındaki ilişkilerini gösteren analiz sonuçları verilmiştir.



**Şekil 4.16 : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsizliği Analizi**



**Şekil 4.17 : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirimsizliği Analizi**



**Şekil 4.18 :** Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Klorür Geçirirliği Analizi

Su kürü uygulanan beton numunelerinden elde edilen akım değerleri, hava kürü uygulanan betonlardan elde edilen akım değerlerinden oldukça düşük olduğu görülmüştür. Düşük dozlu betonlarda silis dumanının etkinlik katsayısının daha fazla olduğu bazı kaynaklarda belirtilmiştir.

#### 4.3.2.3 Etkin Porozite Deneyi Sonuçları

Yapılan istatistiksel çalışma sonucunda etkin porozite katsayıları kullanılarak hava kürleri ve su kürleri için iki ayrı fonksiyon oluşturulmuştur. Etkin porozite katsayıları için oluşturulan fonksiyon denklem (4.4)'de verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1 \times (TB) + a_2 \times (SD/TB) + a_3 \times (S/TB) + a_4 \times (TB)^2 + a_5 \times (SD/TB)^2 + a_6 \times (S/TB)^2 + a_7 \times (TB) \times (SD/TB) + a_8 \times (TB) \times (S/TB) + a_9 \times (TB) \times (S/TB) \quad (4.4)$$

**Tablo 4.12 :** Etkin Porozite Verileri Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatistiksel Değerleri

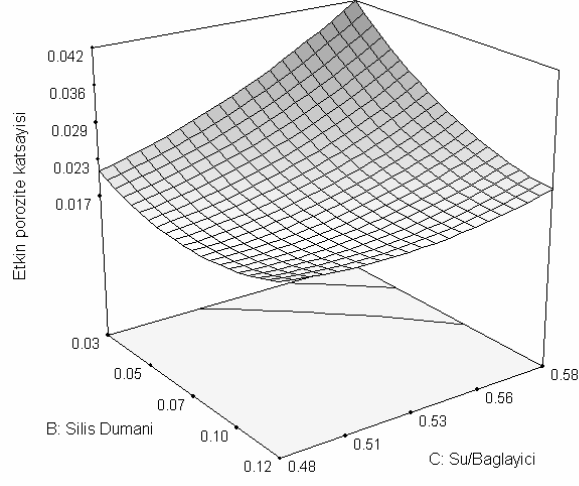
Kür Türü	$r^2$	Ortalama	$\sigma$	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,9516	0,038	0,006982	18,25
Suda	0,9523	0,015	0,003108	21,21

**Tablo 4.13 :** Etkin Porozite Katsayılarıyla Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları ve Değişkenlerin Fonksiyondaki Anlamlılık Dereceleri

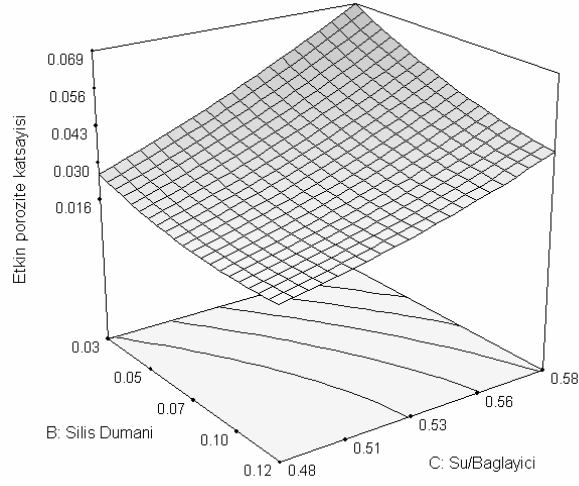
Değişken	Katsayı			F-değeri		Anlamlılık Derecesi	
	Katsayı No	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü
	$a_0$	0,881	0,522				
Toplam Bağlayıcı	$a_1$	-0,002	-0,0015	57,5954	31,5407	0,0001	0,0002
Silis Dumanı / Toplam Bağ.	$a_2$	1,165	0,742	21,9417	47,3155	0,0009	0,0001
Su / Toplam Bağ.	$a_3$	-2,127	-1,231	83,4322	43,6334	0,0001	0,0001
(Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_4$	0,0000009	0,0000009	1,4453	7,5230	0,257	0,0207
(Silis D./Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_5$	1,878	2,418	4,2736	35,7830	0,0656	0,0001
(Su/ Toplam Bağ.) <sup>2</sup>	$a_6$	0,955	0,757	1,6856	5,3404	0,2233	0,0434
(Top.Bağ.) x (Silis D./Top.Bağ.)	$a_7$	-0,0017	-0,001	2,3077	4,1933	0,1597	0,0678
(Top. Bağ.)x(Su/ Top. Bağ.)	$a_8$	0,0046	0,0019	21,703	18,6889	0,0009	0,0015
(Silis D./Top.Bağ.)x(Su/ Top.Bağ.)	$a_9$	-2,0000	-1,667	3,3231	11,6482	0,0983	0,0066
Oluşturulan Model				21,85	22,20	0,0001	0,0001

Yapılan istatistiksel çalışmanın değerleri Tablo 4.12'de, bu fonksiyonu oluşturan değişkenlerin katsayıları, F-değerleri ve anlamlılık dereceleri Tablo 4.13'de verilmiştir. Tablo 4.13'deki F-değerleri ve anlamlılık dereceleri incelendiğinde hava kürleri numuneleri için oluşturulan fonksiyonda (Toplam bağlayıcı), (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı), (Su/Toplam bağlayıcı), (Silis dumanı/Toplam Bağlayıcı)<sup>2</sup> ve ((Toplam bağlayıcı) x (su/toplam bağlayıcı)) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları görülmektedir. Su kürü numuneleri için oluşturulan denklemde ise (Toplam bağlayıcı), (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı), (Su/Toplam bağlayıcı), (Toplam bağlayıcı)<sup>2</sup>, (Silis dumanı/ Toplam bağlayıcı)<sup>2</sup>, (Su/Toplam bağlayıcı)<sup>2</sup>, ((Toplam bağlayıcı) x (su/toplam bağlayıcı)) ve (Silis dumanı/Toplam bağlayıcı) x (Su/Toplam bağlayıcı) değişkenlerinin ilişki üzerinde etkili oldukları sonucuna varılmıştır.

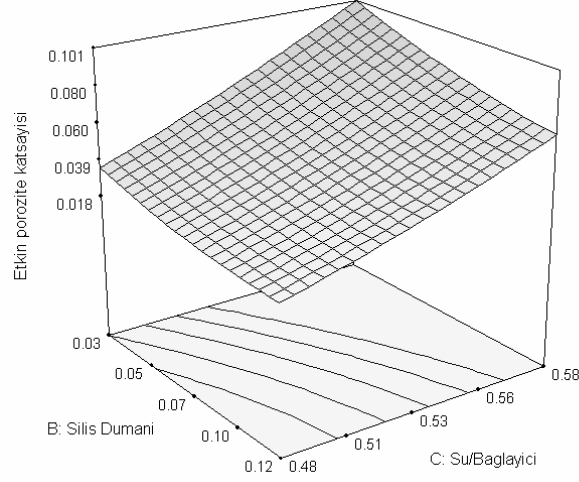




**Şekil 4.19 :** Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi

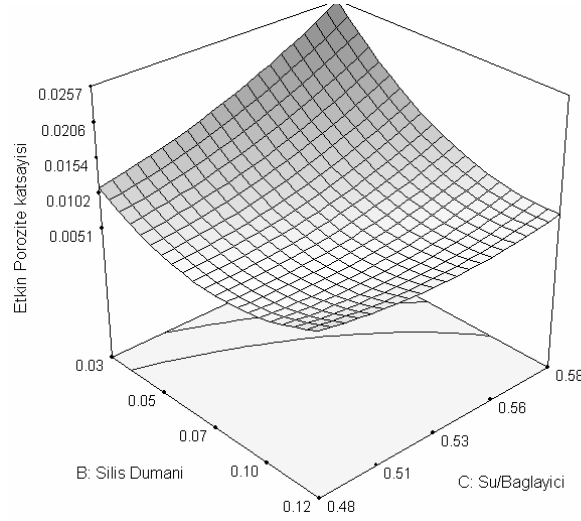


**Şekil 4.20 :** Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi

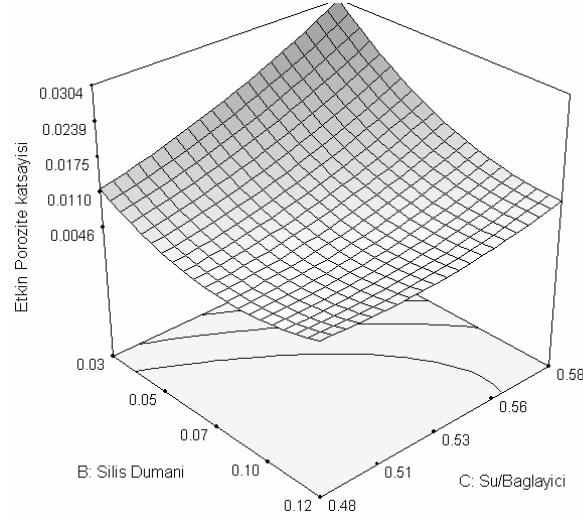


**Şekil 4.21 :** Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi

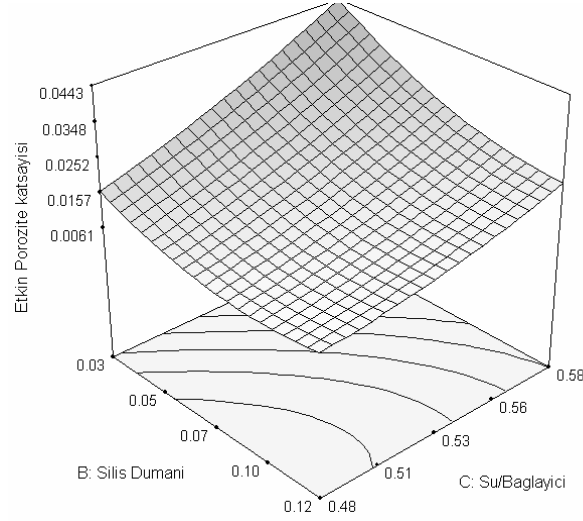
Fagerlund yöntemine göre hesaplanan etkin porozite katsayılarının analiz sonucu elde edilen grafikleri Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir. Azalan dozajla birlikte çimento hamurunun boşluk yapısını olumsuz etkisinin de azalmasıyla birlikte boşluk oranının düştüğü görülmüştür. Ayrıca su/bağlayıcı oranının azalması ve silis dumani oranının artmasıyla birlikte etkin porozite değerleri de azalmıştır.



**Şekil 4.22 :** Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi



**Şekil 4.23 :** Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi



**Şekil 4.24 :** Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Etkin Porozite Analizi

Şekil 4.22,4.23 ve 4.24'deki grafiklerde de görüldüğü gibi su kürü uygulanan beton numunelerinde kürün olumlu etkisi görülmüştür. Azalan dozaj ve artan silis dumani oranı ile birlikte, etkin porozite değerleri de azalmıştır.

#### 4.3.2.4 Özdirenç Ölçümleri

Ek-A'da verilen grafiklerde S4, S7, S8 ve S12 numunelerinin, 1 molar klorür içeren havuza yerleştirilmeleriyle birlikte azalan özdirenç değerlerinin, zamanla korozyon hızını kontrol edemez durumda olduğu kabul edilen sınır değer olan 10 k $\Omega$  değerinin altına düştüğü görülmektedir. Bu numunelerden S4 silis dumani içermezken, S8 ve

S12 numuneleri alt değer olan 0,03 oranında silis dumanı içermektedir. S7 numunesi ise Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre girilen üst su/bağlayıcı değerinin üzerinde, en yüksek su/bağlayıcı oranına sahip olan numunedir. Diğer beton numunelerinde özdirençin sınır değerinin altında değer tespit edilmemiştir. Ek-B'de özdirenç-zaman grafikleri verilen 90 gün su kürü uygulanmış numunelerin özdirenç değerleri hava kürü uygulanmış numunelere göre daha yüksek olmakla birlikte, S4 ve S8 numunelerinin özdirenç değerlerinin sınır değer olan 10 k $\Omega$  sınır değerinin altına düştüğü belirlenmiştir.

#### **4.3.2.5 Korozyon Potansiyeli Ölçümlerinin Değerlendirilmesi**

90 gün hava kürü uygulandıktan sonra 1 molar klorür içeren havuza yerleştirilen numunelerde yapılan korozyon potansiyeli ölçümlerinde, özdirenç ölçümlerinde sınır değerin altına düşen S4, S7, S8, S12 numunelerin korozyon potansiyel değerleri de Ek-C'de 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 değerin 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. 90 gün su kürü uygulanmış ve korozyon potansiyeli grafikleri Ek-D'de verilen numunelerde ölçüm süresi boyunca korozyon potansiyeli alt sınır değer olan -350 mV'un altına düşmemiştir.

#### **4.3.3 Lineer Polarizasyon Ölçümlerinin Değerlendirilmesi**

Lineer polarizasyon ölçümlerinden elde edilen grafikleri Ek-E'de verilen 90 gün hava kürüne tabi tutulmuş numuneler üzerinde yapılan lineer polarizasyon ölçümlerinde korozyon potansiyeli ölçümlerinde riskli gruba giren S7, S8, S12 numunelerinde yüksek korozyon hızı olarak nitelendirilen 1  $\mu\text{a}/\text{cm}^2$  değerinin üzerine çıkmıştır. Ek-F'de su kürü uygulanmış numunelerin lineer polarizasyon ölçümlerinin grafikleri görülmektedir. Buna göre su kürü uygulanmış numunelerde korozyon başlangıcı olarak kabul edilen sınır değer olan 1  $\mu\text{a}/\text{cm}^2$  değerini numunelerden hiçbirisi geçmemiştir. Bu dürüm silis dumanı içeren ve yüksek su/bağlayıcı içeren betonlarda su kürünün önemini göstermektedir.

#### 4.3.4 Optimizasyon

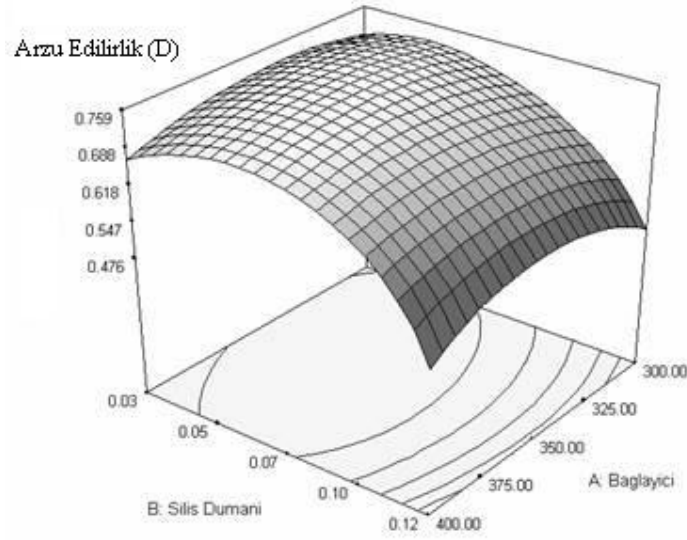
Üretilen betonların kalıcılık özelliklerinin iyi olmasının yanı sıra, maliyetlerinin de belirli mertebelerde olması gerekmektedir. Tez çalışmasında üretilen betonların birim maliyetleri belirlenmiş ve yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında geçirimsizlik özellikleri ve maliyeti düşük, basınç mukavemeti yüksek olacak şekilde hava kürü ve su kürü için optimum beton karışımları bulunmuştur.

Hava kürü uygulanmış betonlar için elde edilen optimum beton karışımı değerleri ve bu karışım oranları kullanıldığında elde edilmesi beklenen sonuçlar Tablo 4.14'de verilmiştir.

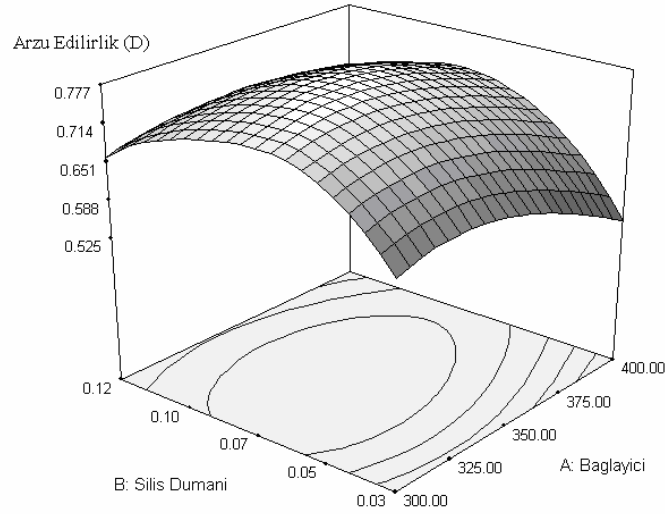
**Tablo 4.14 :**Yapılan Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler

Malzemeler	Kür Koşulu	
	Hava Kürü	Su Kürü
Toplam Bağlayıcı (kg/m <sup>3</sup> )	348,55	337,38
Silis Dumanı/Toplam bağlayıcı	0,06	0,07
Su/Bağlayıcı	0,48	0,52
Basınç Dayanımı (MPa)	54,73	58,74
Klorür Geçirimsizliği (coulomb)	717	286
Kapilarite (kg/m <sup>2</sup> .√sn)	0,010	0,0059
Etkin Porozite (kg/dm <sup>3</sup> )	0,020	0,0064
Maliyet (YTL/m <sup>3</sup> )	82,64	79,94
Arzu Edilirlik (D)	0,759	0,777

Hava kürüne tabi tutulmuş betonun dayanımının maksimum, geçirimsizlik ve maliyetin minimum yapılması halinde arzu edilirliğin (D), silis dumanı ve toplam bağlayıcı miktarıyla değişimini gösteren tepki yüzeyi Şekil 4.25'de, su kürüne ait değerler kullanılarak oluşturulan tepki yüzeyi şekil 4.26'da verilmiştir.



**Şekil 4.25 :** Hava Kürllerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimsizlik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edirliğin (D) Silis Dumani/Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi



**Şekil 4.26 :** Su Kürllerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimsizlik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edirliğin (D) Silis Dumani/Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi

## 5. GENEL SONUÇLAR

Silis dumanının, betonun durabilite özelliklerine etkisinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, farklı oranlarda silis dumanı içeren beton numunelerinde farklı kür koşullarının etkisinde basınç dayanımı, kılcallık ve hızlı klorür geçirimliliği deneyleri yapılmış, betonların özdirençleri ölçülerek, belirli aralıklarla korozyon potansiyelleri ve korozyon hızları ölçülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Silis dumanı betonların basınç dayanımını arttırmıştır, ayrıca su/bağlayıcı miktarının azalması ve artan dozajla birlikte basınç dayanımı değerlerinde önemli ölçüde artış kaydedilmiştir.
- Silis dumanı katkılı betonlarda yapılan kılcal su emme deneyleri sonucunda, artan silis dumanının kılcallık katsayısını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Bununla birlikte su/bağlayıcı miktarının ve azalan dozajın da kılcal su emme değerlerinin düşmesinde büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir.
- Hızlı klorür geçirimliliği deneylerinden elde edilen akım değerleri göz önüne alındığında, klorür geçirimliliği en yüksek betonlar su/bağlayıcı oranı yüksek ve silis dumanı oranı düşük ya da hiç silis dumanı içermeyen betonlar olmuştur.
- Geçirimsizlik değerleri kür koşulları açısından incelendiğinde, özellikle su/bağlayıcı oranı ve dozajı yüksek olan betonların su kürü uygulanmış numunelerinden elde edilen sonuçlar hava kürü numunelerinden elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında su kürünün olumlu etkisi daha fazla görülmektedir.
- Hava kürüne tabi 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 oldukça kötü performans sergileyen beton numunelerinin de özdirenç değerlerinin sınır değerinin altına düştüğü görülmüştür. Su kürü uygulanmış beton numunelerinin özdirenç değerleri daha yüksek çıkmasına karşın, silis dumanı içermeyen veya çok yüksek su/bağlayıcı içeren betonların özdirençleri yine sınır değerinin altına düşmüştür.

- Yarı hücre ölçümlerinde hava kürü uygulanmış ve ardından 1 molar Cl içeren çözeltiye yerleştirilen numunelerde özdirençleri düşük, kılcallık katsayıları ve klorür geçirimsizlikleri yüksek olan betonlar dışındaki betonların ilk günlerde yüksek olan korozyon potansiyeli değerleri zamanla azalmıştır. Özdirençleri düşük olan betonlarda ise korozyon potansiyeli -350 mV olan sınır değeri geçmiştir. Su kürü uygulanmış numunelerde korozyon potansiyelinin azalması durumu fazla gözlemlenmezken, su kürüne tabi tutulmuş hiçbir numune tez çalışması süresince sınır değeri geçmemiştir. Ayrıca silis dumanı oranı yüksek, su/bağlayıcı oranı düşük betonunda oldukça yüksek özdirenç değerleri elde edilmiştir.
- Lineer polarizasyon ölçümleri sonucunda hava kürüne tabi tutulmuş beton numuneleri içerisinde korozyon başlangıcı olarak kabul edilen korozyon hızı değerini su/bağlayıcı oranı yüksek ve silis dumanı oranı düşük betonlar geçerken, su kürü uygulanmış numunelerden hiçbiri sınır değeri geçmemiştir.



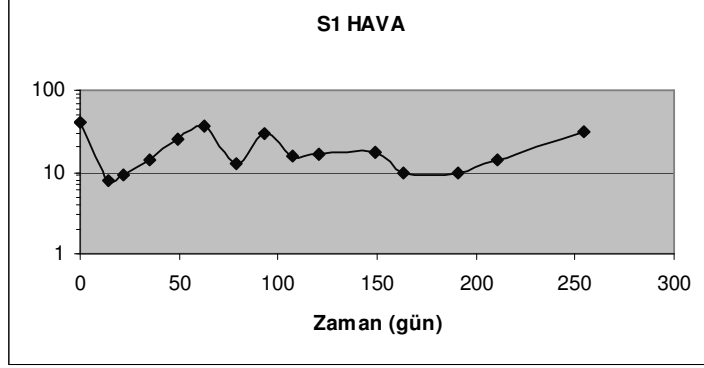
## KAYNAKLAR

- [1] **Ersoy, U. ve Özcebe, G.**, 2001. Betonarme, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- [2] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2001. Betonarme Yapılar, İhlas Matbaacılık, İstanbul.
- [3] **Erdal, M.**, 2002. Beton Dayanımının Bazı Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [4] **Ağar, E. ve Öztaş, G. ve Sütaş, İ.**, 1998, Beton Yollar, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [5] **Mather, Bryant.**, 2004. Concrete Durability, **26**, 3-4.
- [6] **Taşdemir, C.**, 2003. Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete, *Cement and Concrete Research*, **33**, 1637–1642.
- [7] **Onaran, K.**, 2000. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul
- [8] **Güner, S. ve Süme, V.**, 2000. Yapı Malzemesi ve Beton, Aktif Yayınevi, Erzurum.
- [9] **Fagerlund, G.**, 1982. On the capillarity of concrete. Nordic Concrete Research, Nordic Concrete Federation. Publication No 1,
- [10] **Shi, C.**, 2004. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results, *Cement and Concrete Research*, **34**, 537–545.
- [11] **ASTM C 1202**, 1997. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, U.S.A.
- [12] **Kocataşkın, F.**, 1959. Beton Teknolojisi, Kutulmuş Matbaası, İstanbul.
- [13] **Yılmaz, Kemalettin.**, 1988. Yapı Malzemesi Ve Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Matbaası, Sakarya.
- [14] **Tokyay, M. ve Erdoğan, K.**, 2005. Cürüfler Ve Cürüflü Çimentolar, Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [15] **Türker, P. ve Erdoğan, B. ve Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A.**, 2004. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri, Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

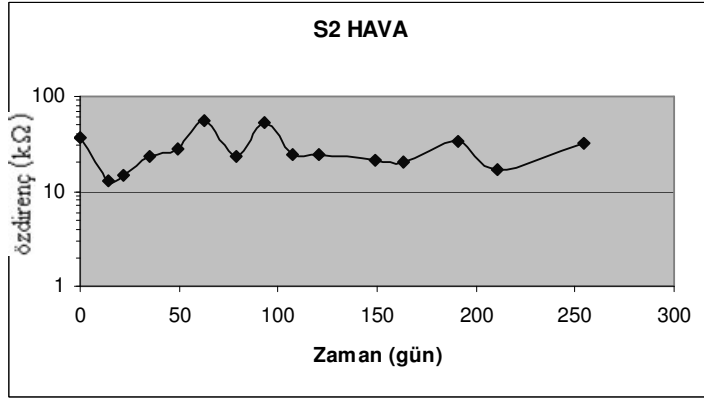
- [16] **Yeğınobalı, A.**, 2003. Silis Dumanı Ve Çimento İle Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- [17] **Yüzer, Nabi.**, 1998. Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi İle Araştırılması, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Mazloom, M., ve Ramezaniapour, A.A. ve Brooks, J.J.**, 2004. Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, *Cement & Concrete Composites*, **26**, 347-357
- [19] **Toutanji, H. ve Bayasi, Z.**, 1999. Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete, *Cement and Concrete Research*, **29**, 497-501.
- [20] **Coşgun, T.**, 2003. İstanbulda Deprem Sonrası Yapılan İncelemelerde Karşılaşılan Korozyon Hasarı Üzerine Bir İnceleme, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, 5. Ulusal Beton Kongresi, Sayfa 269-278, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul.
- [21] **Hoşhan, P.**, 1994. Beton İçindeki Çeliğın Korozyonunun Üç Elektrot Yöntemi İle İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22] **ASTM C 876-91**, 1999. Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM, U.S.A.
- [23] **Carino, N.**, 1999. Nondestructive Techniques To Investigate Corrosion Status In Concrete Structures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, August, 96-106
- [24] **Erdoğdu, Ş.**, 2003. Betonda Donatı Korozyonu-Ölçümü ve İrdelenmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Yöntemler ve Teknikler, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, 5. Ulusal Beton Kongresi, Sayfa 247-260, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul.
- [25] **TS EN 934-2**, 2002. Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet için Bölüm:2 Beton Katkıları- Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme.
- [26] **TS 802**, 1985. Beton Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

## **EKLER**

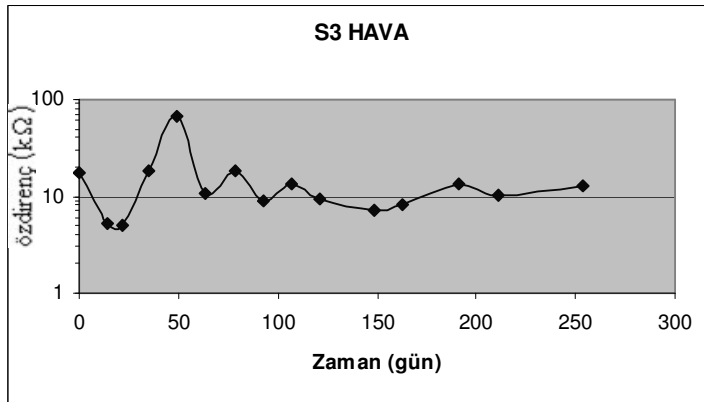
## Ek\_A



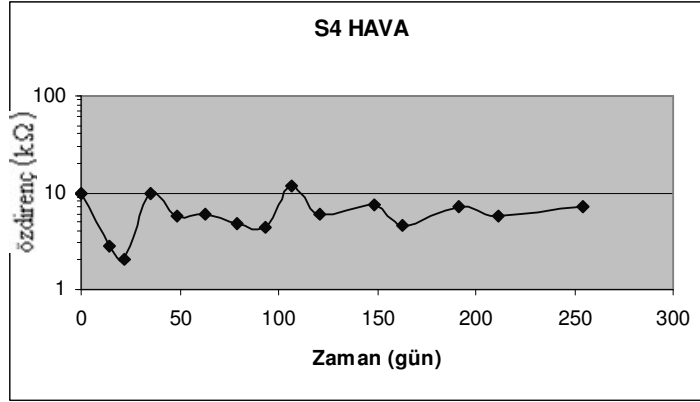
Şekil A.1 : Hava Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



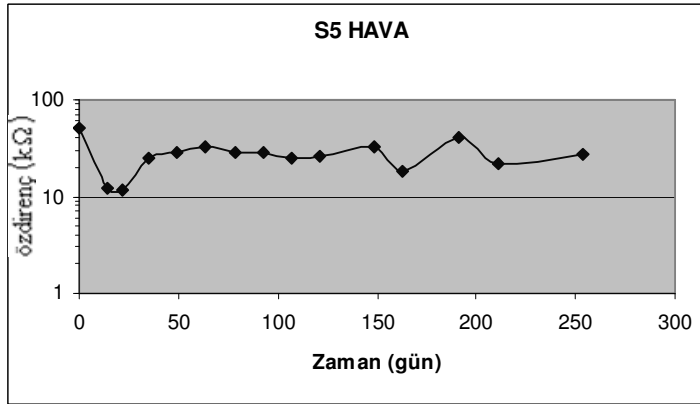
Şekil A.2 : Hava Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



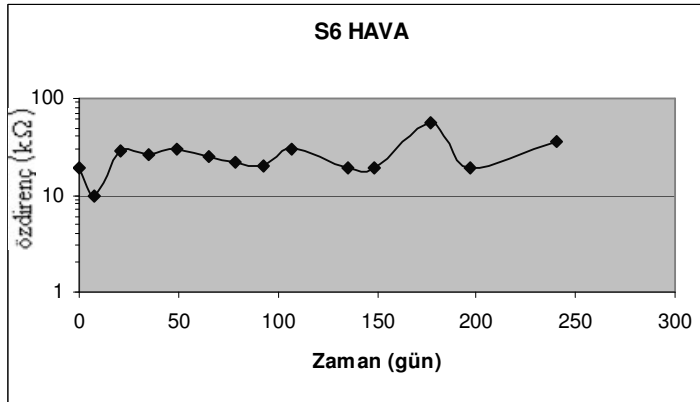
Şekil A.3 : Hava Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



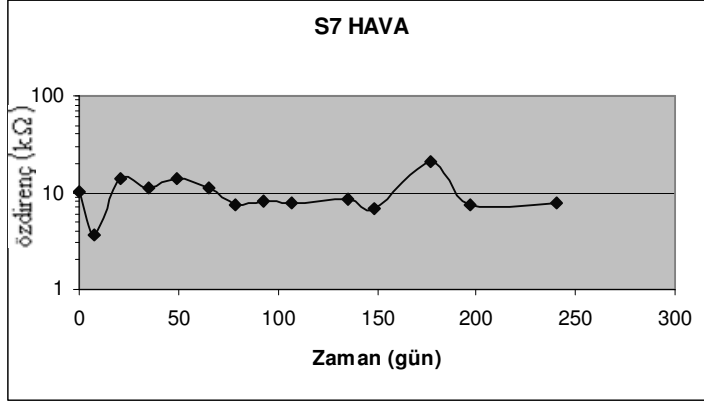
Şekil A.4 : Hava Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



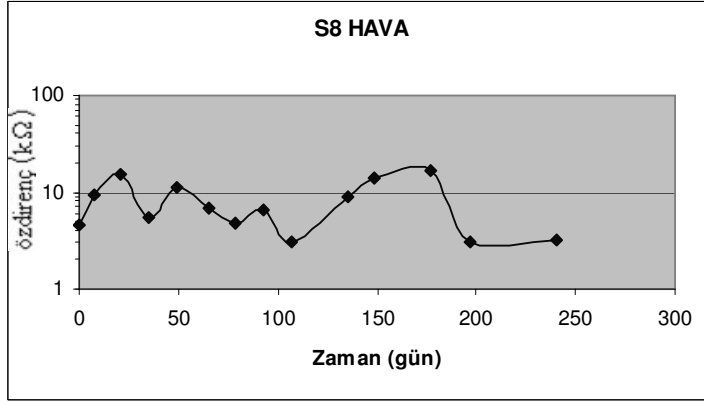
Şekil A.5 : Hava Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



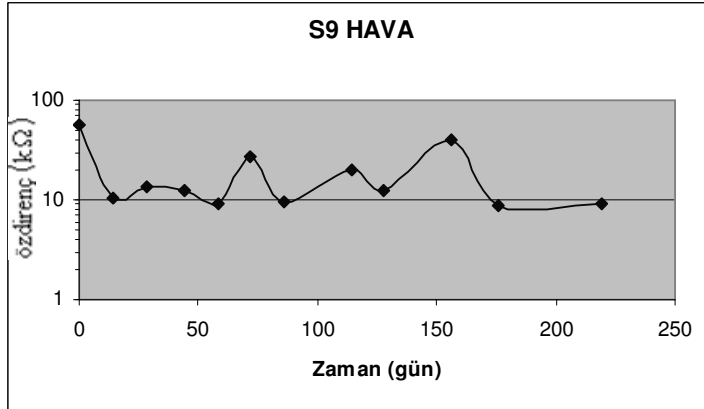
Şekil A.6 : Hava Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



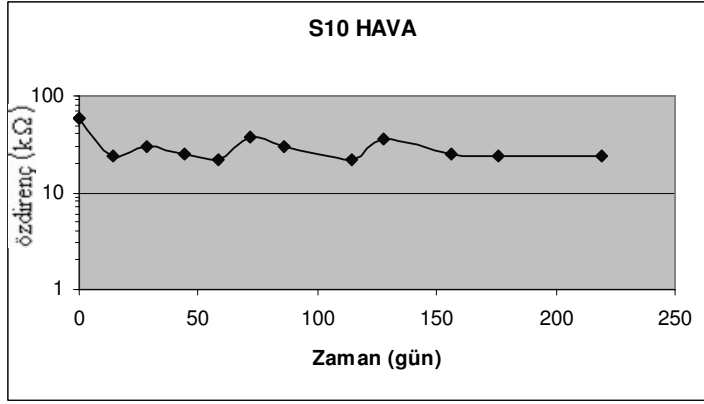
Şekil A.7 : Hava Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



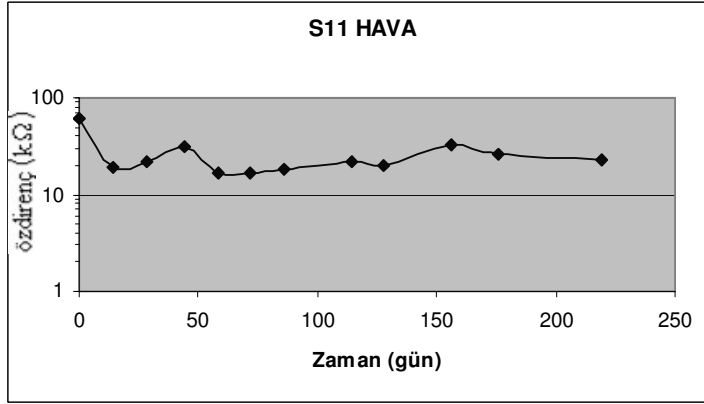
Şekil A.8 : Hava Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



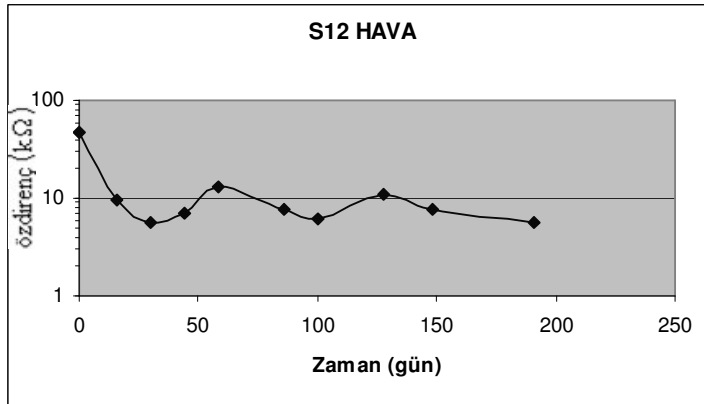
Şekil A.9 : Hava Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



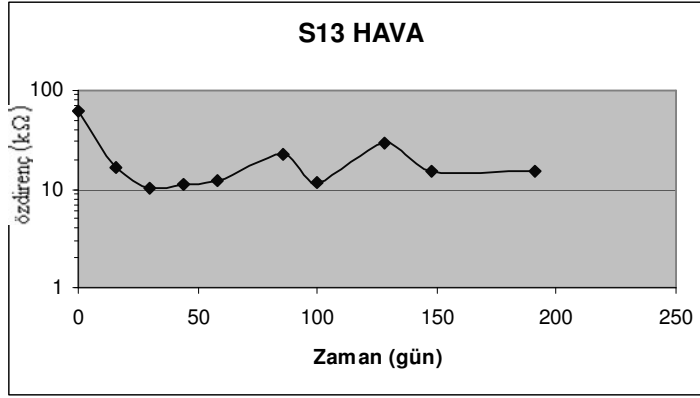
Şekil A.10 : Hava Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



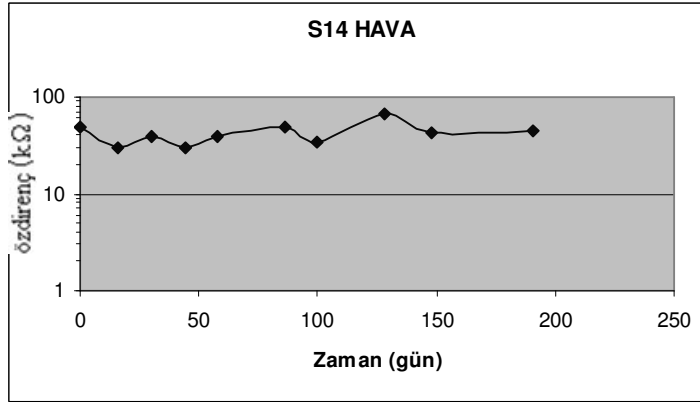
Şekil A.11 : Hava Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



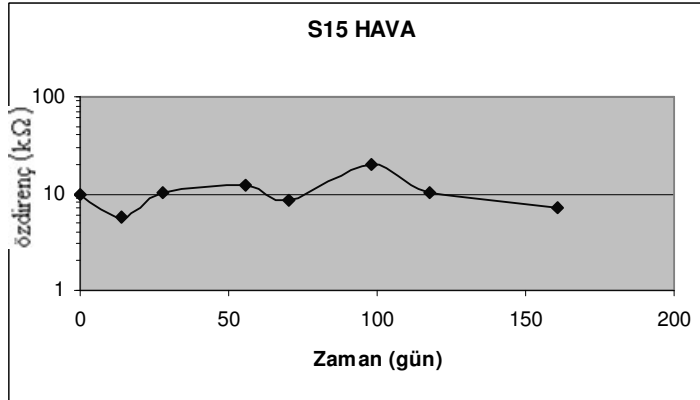
Şekil A.12 : Hava Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



Şekil A.13 : Hava Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

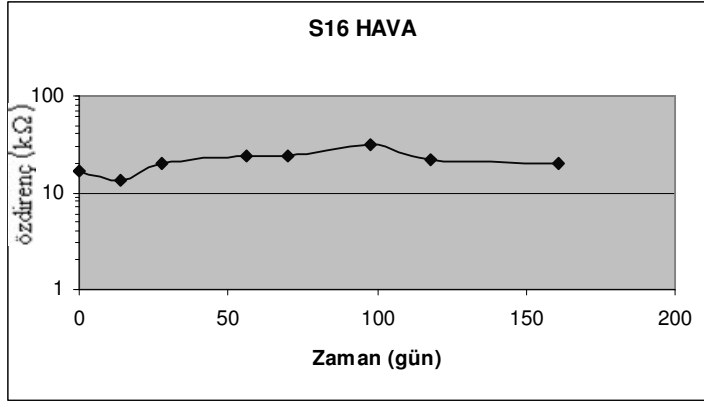


Şekil A.14 : Hava Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

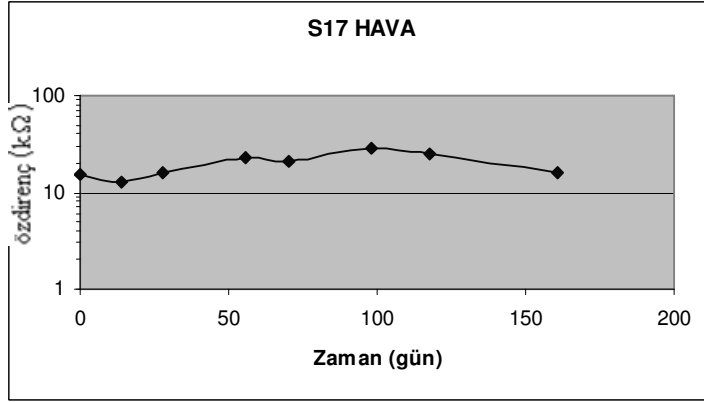


Şekil A.15 : Hava Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

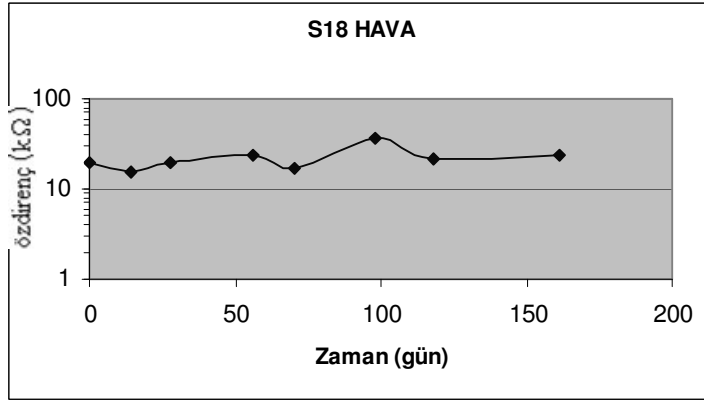




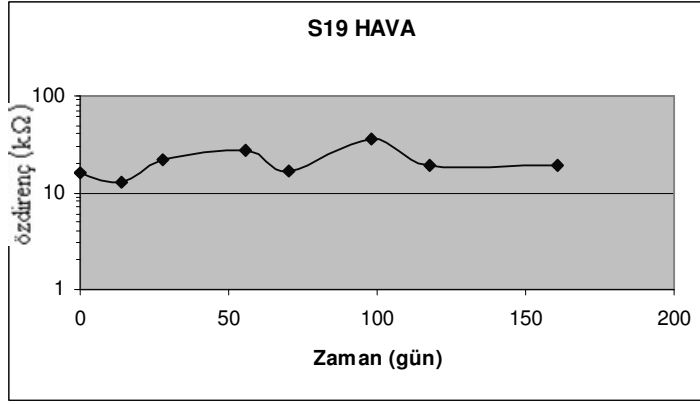
Şekil A.16 : Hava Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



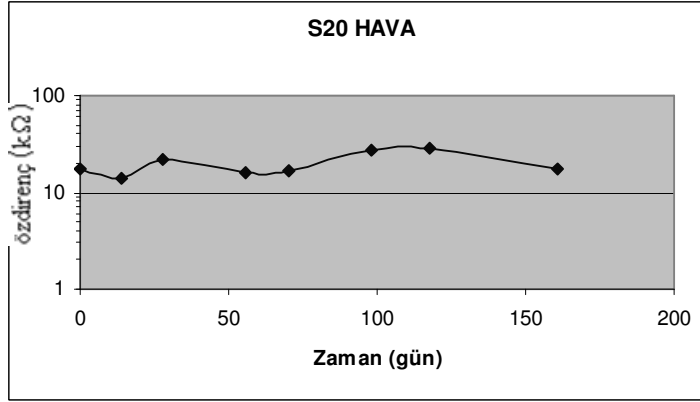
Şekil A.17 : Hava Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



Şekil A.18 : Hava Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

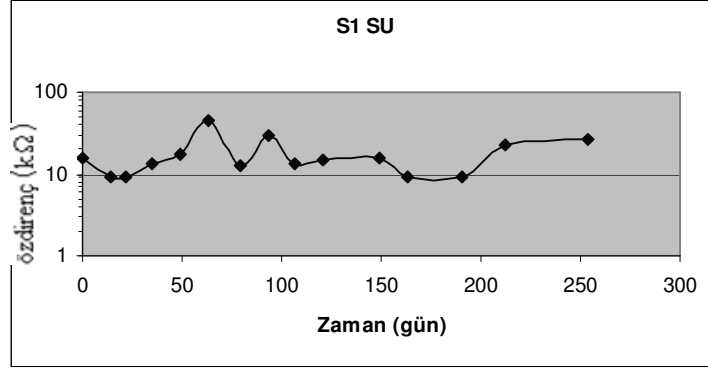


**Şekil A.19 :** Hava Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

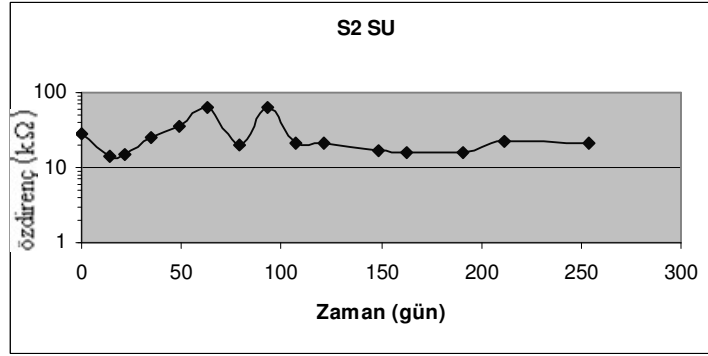


**Şekil A.20 :** Hava Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

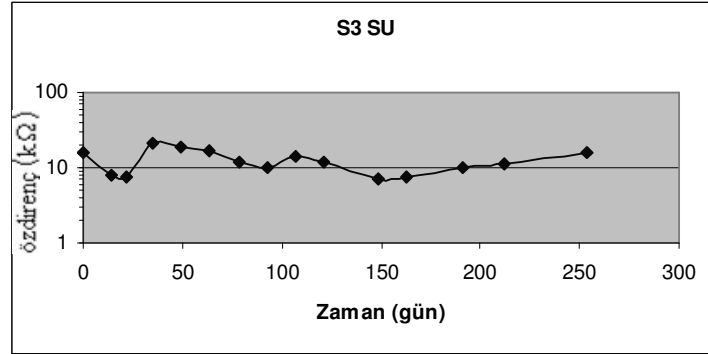
## Ek\_B



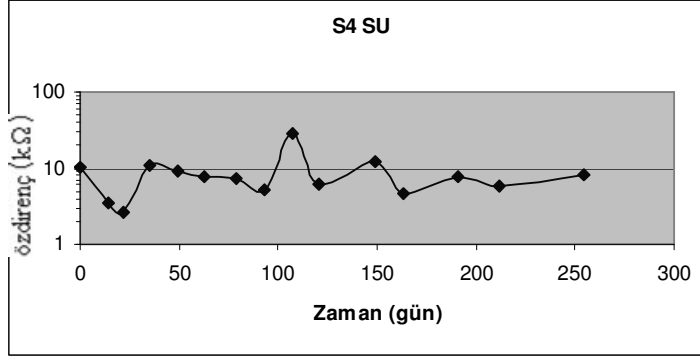
Şekil B.1 : Su Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



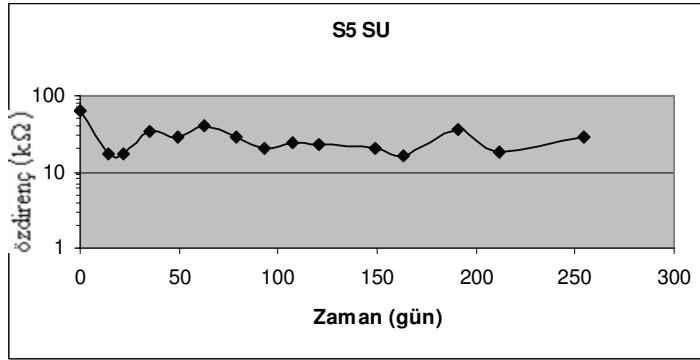
Şekil B.2 : Su Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



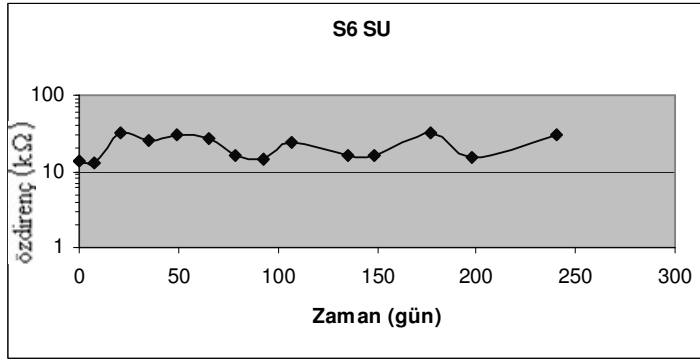
Şekil B.3 : Su Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



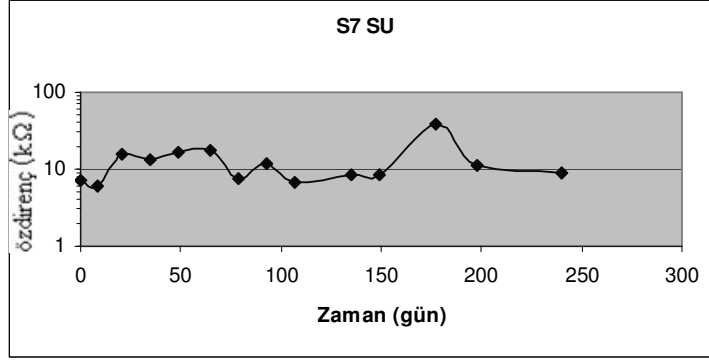
Şekil B.4 : Su Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



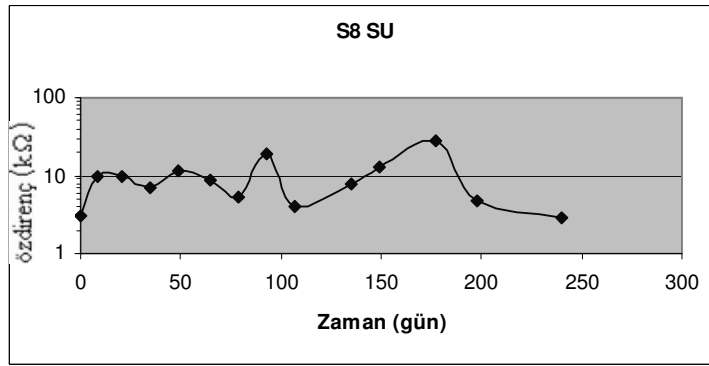
Şekil B.5 : Su Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



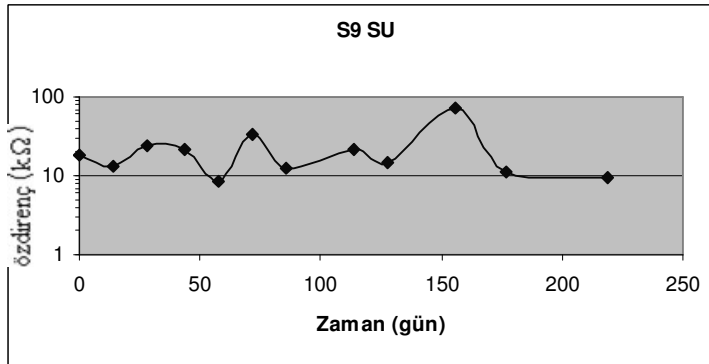
Şekil B.6 : Su Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



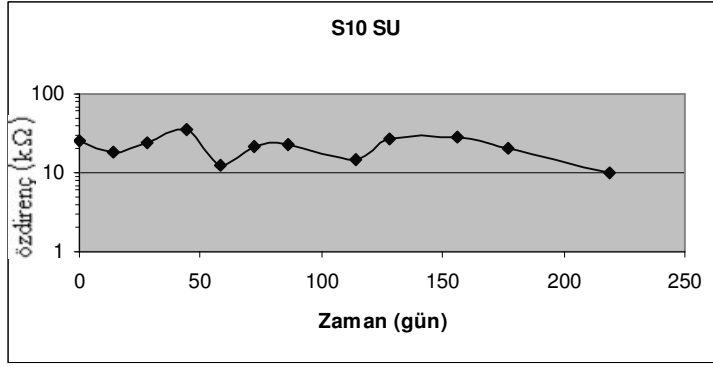
**Şekil B.7 :** Su Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



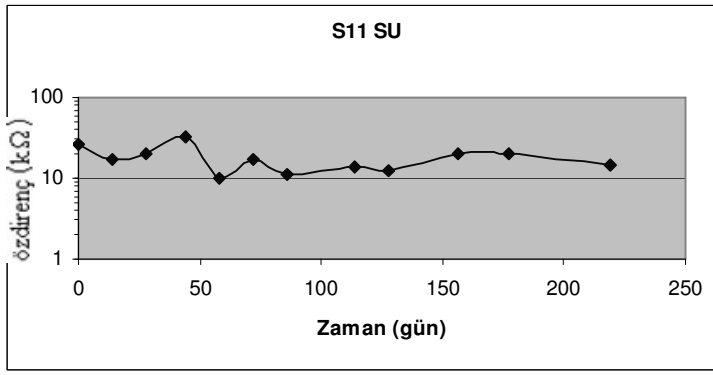
**Şekil B.8 :** Su Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



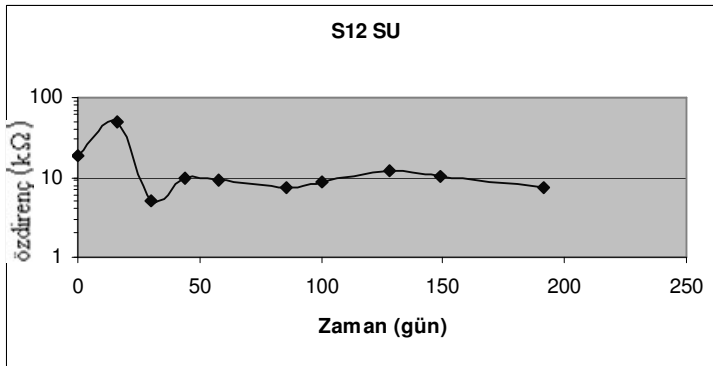
**Şekil B.9 :** Su Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



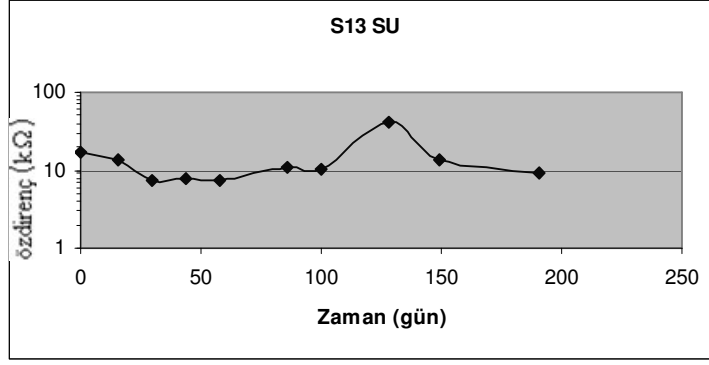
Şekil B.10 : Su Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



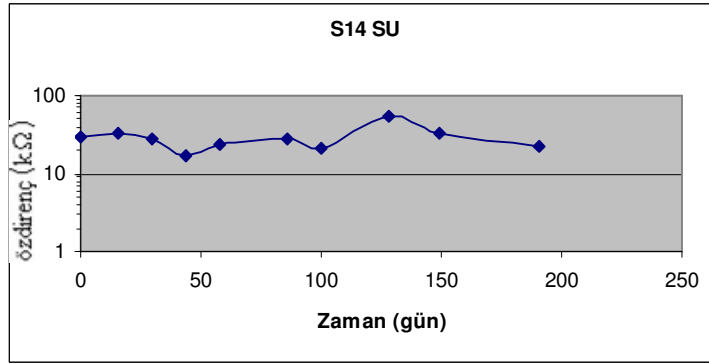
Şekil B.11 : Su Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



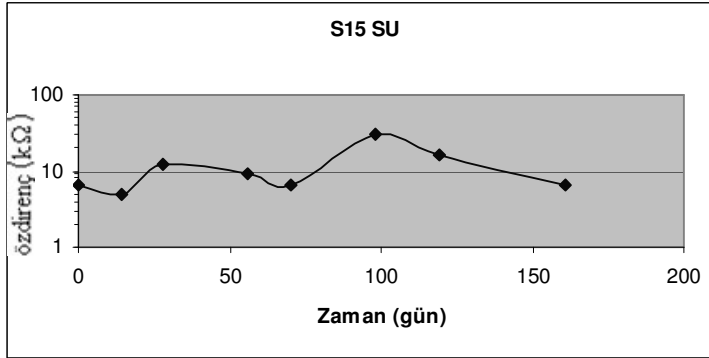
Şekil B.12 : Su Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



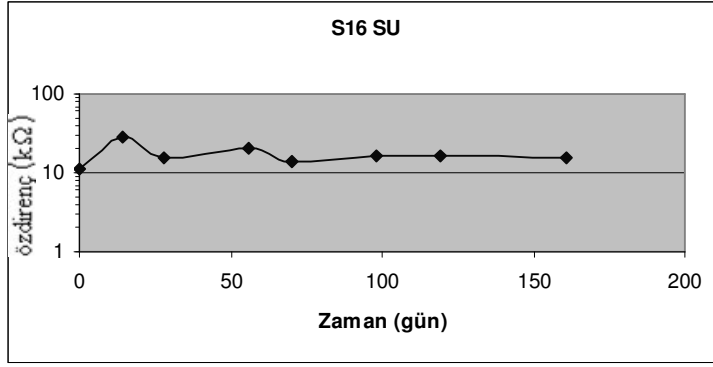
Şekil B.13 : Su Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



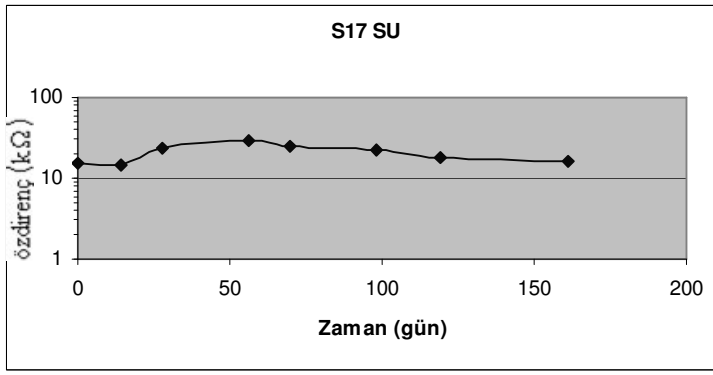
Şekil B.14 : Su Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



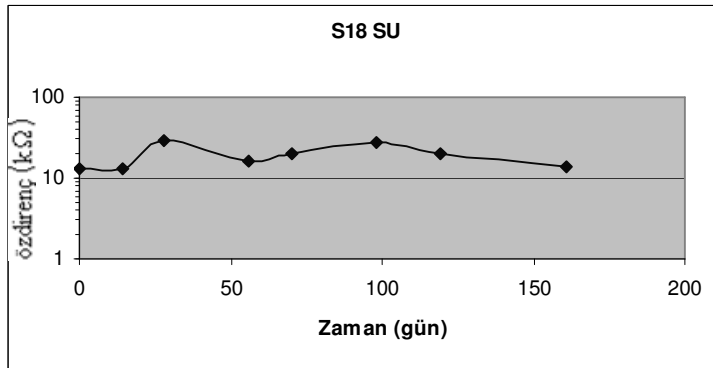
Şekil B.15 : Su Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



Şekil B.16 : Su Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

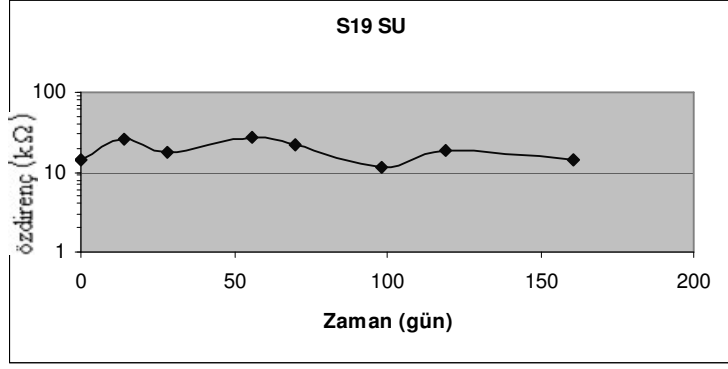


Şekil B.17 : Su Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

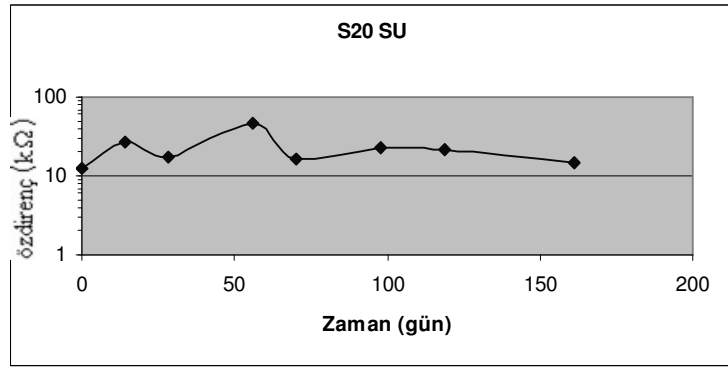


Şekil B.18 : Su Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



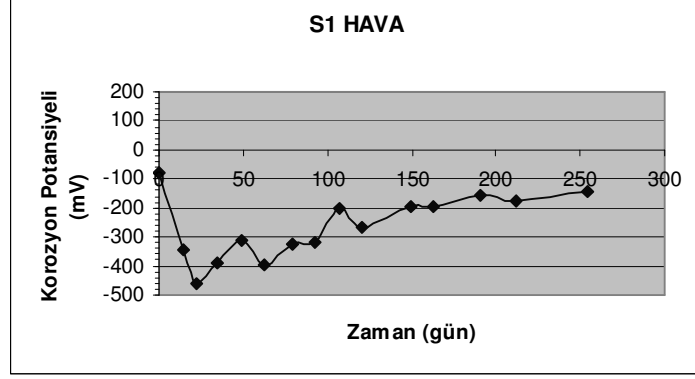


Şekil B.19 : Su Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

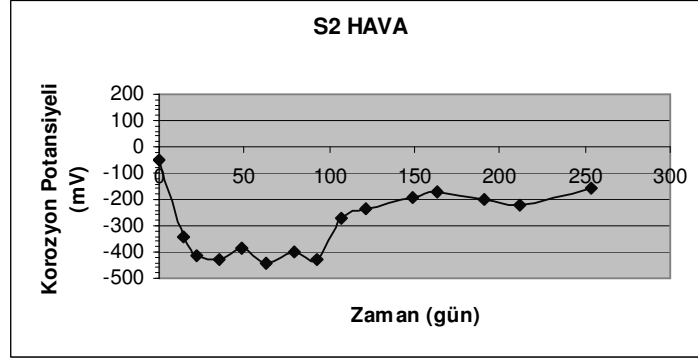


Şekil B.20 : Su Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

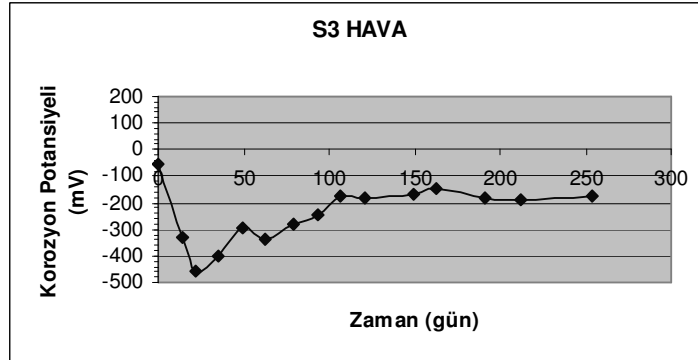
## Ek\_C



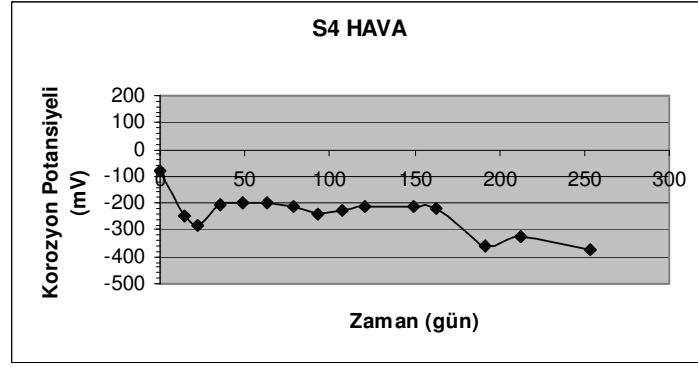
Şekil C.1 : Hava Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



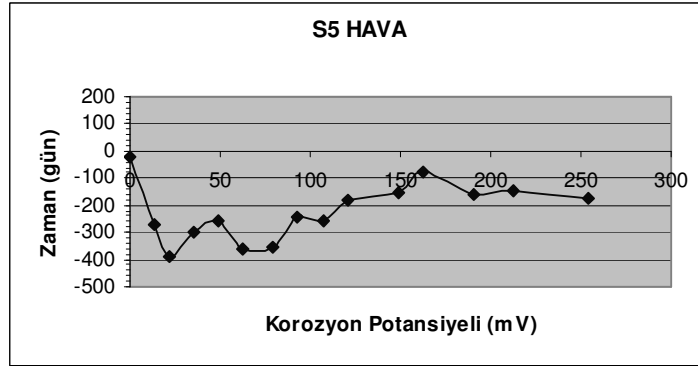
Şekil C.2 : Hava Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



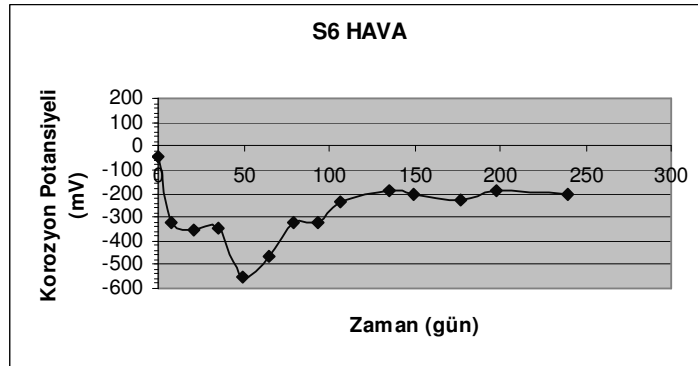
Şekil C.3 : Hava Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



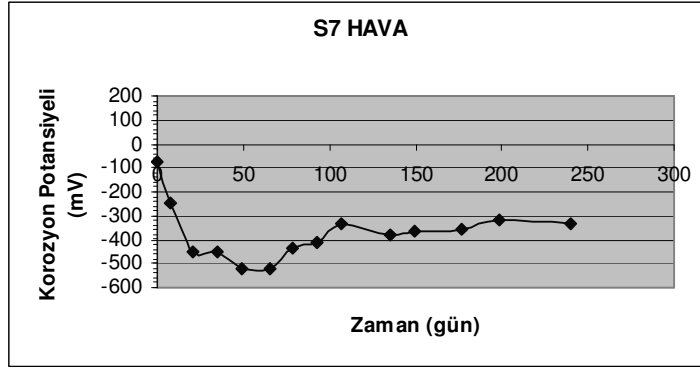
Şekil C.4 : Hava Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



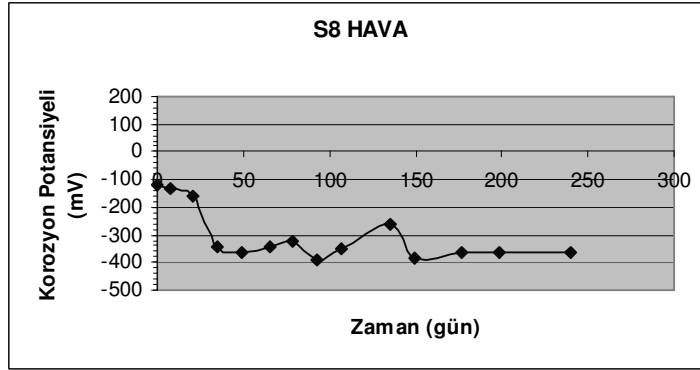
Şekil C.5 : Hava Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



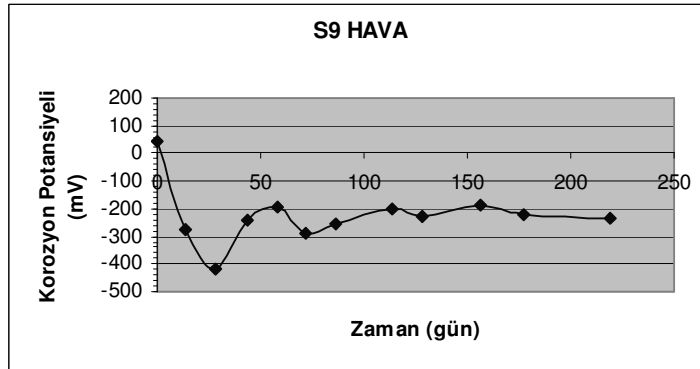
Şekil C.6 : Hava Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



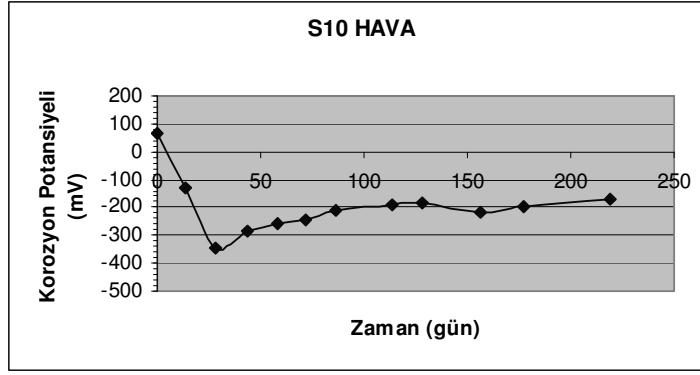
Şekil C.7 : Hava Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



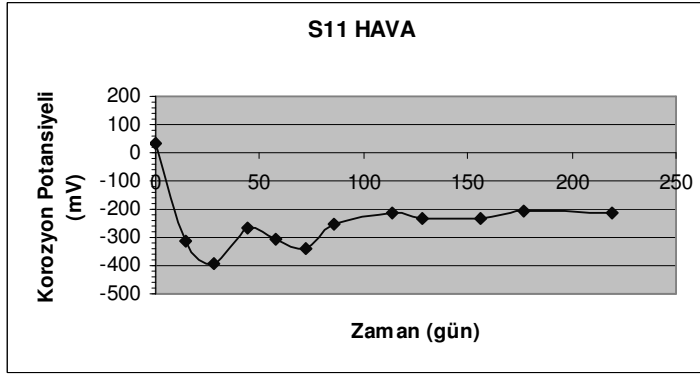
Şekil C.8 : Hava Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



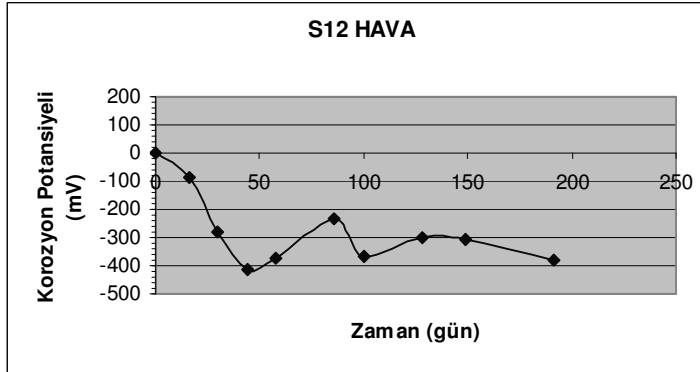
Şekil C.9 : Hava Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



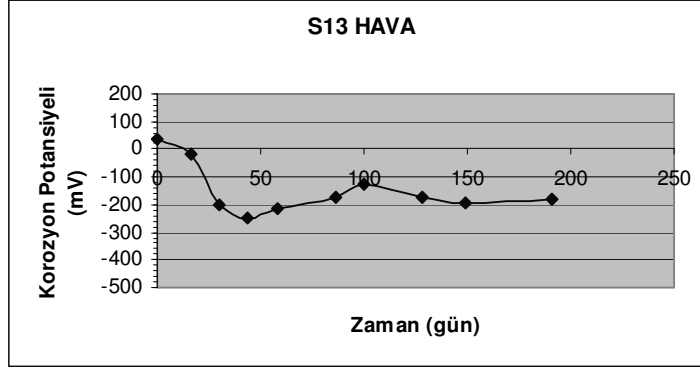
Şekil C.10 : Hava Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



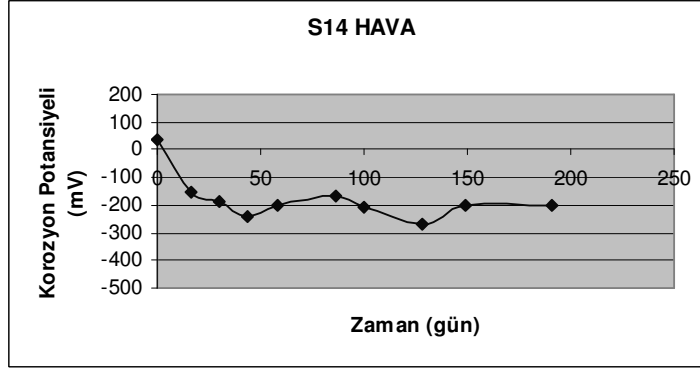
Şekil C.11 : Hava Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



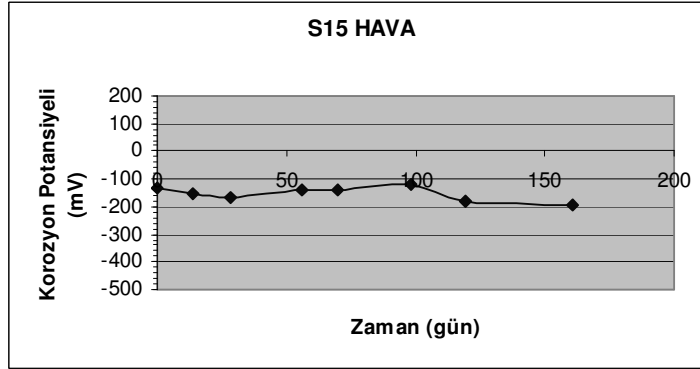
Şekil C.12 : Hava Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



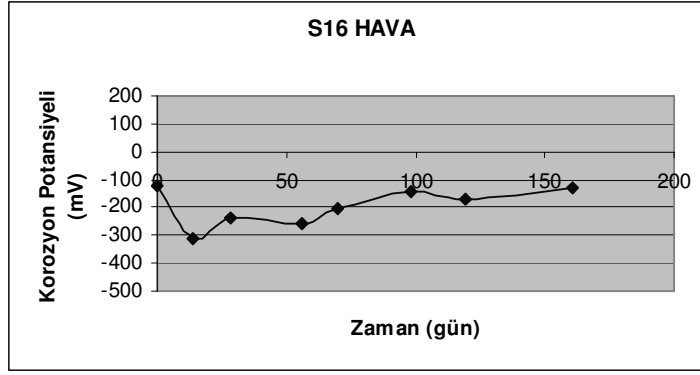
**Şekil C.13 :** Hava Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



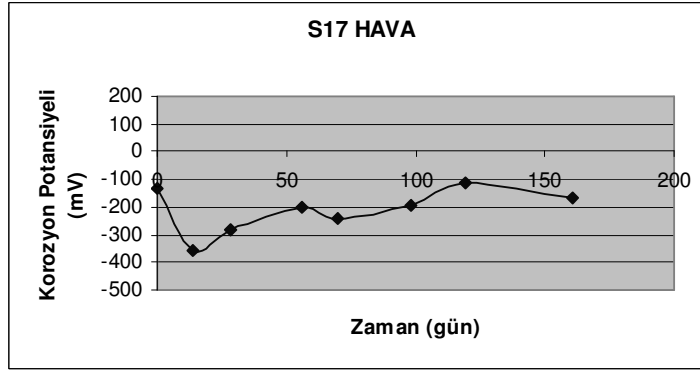
**Şekil C.14 :** Hava Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



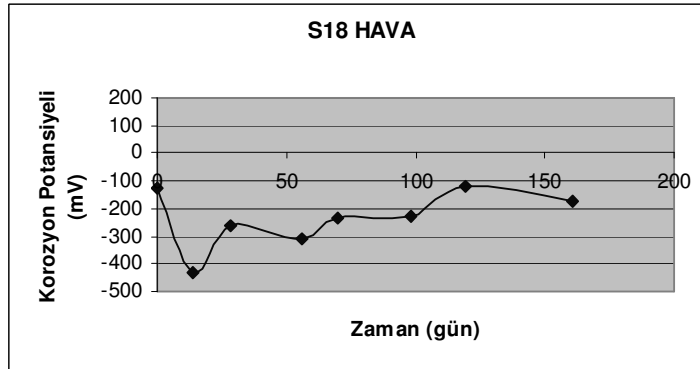
**Şekil C.15 :** Hava Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



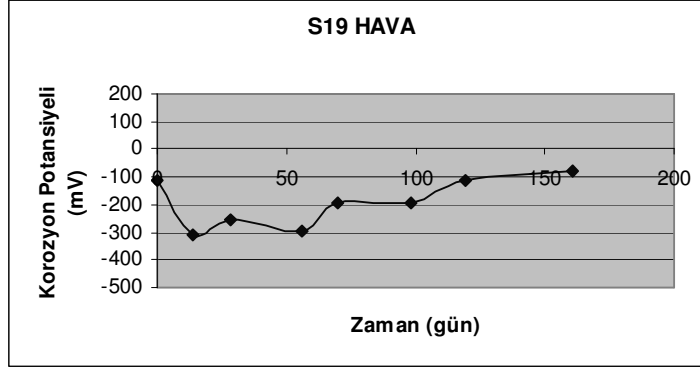
**Şekil C.16 :** Hava Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



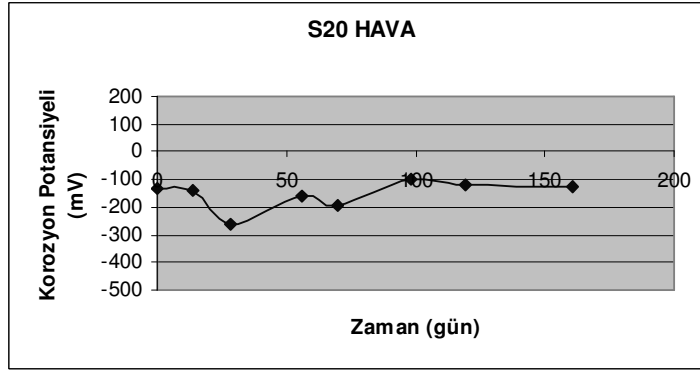
**Şekil C.17 :** Hava Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



**Şekil C.18 :** Hava Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



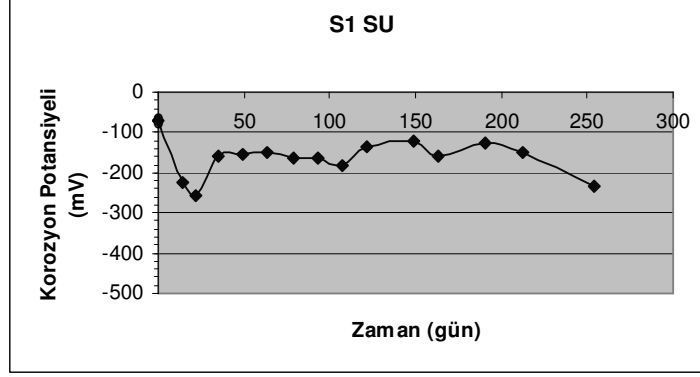
**Şekil C.19 :** Hava Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



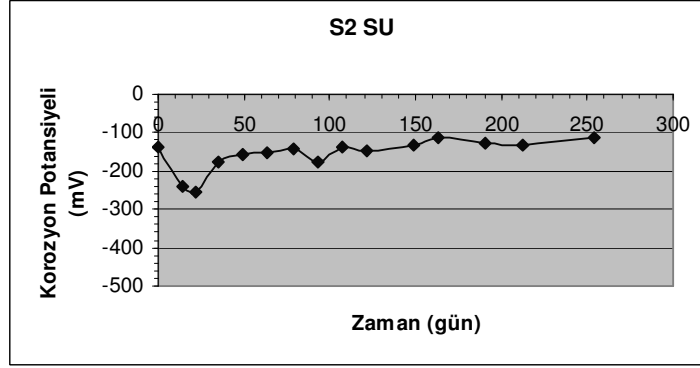
**Şekil C.20 :** Hava Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



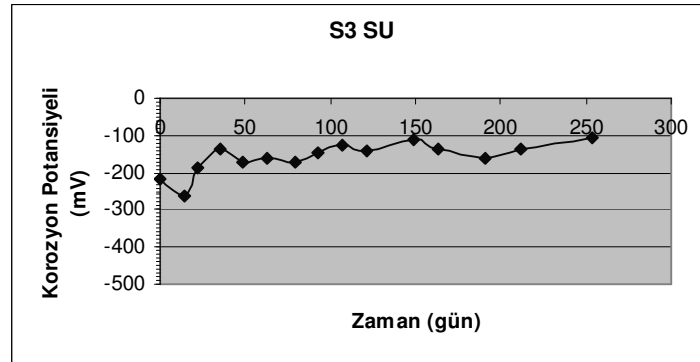
## Ek\_D



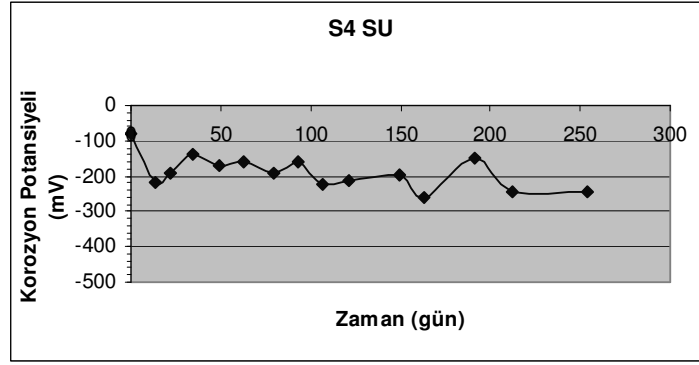
Şekil D.1 : Su Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



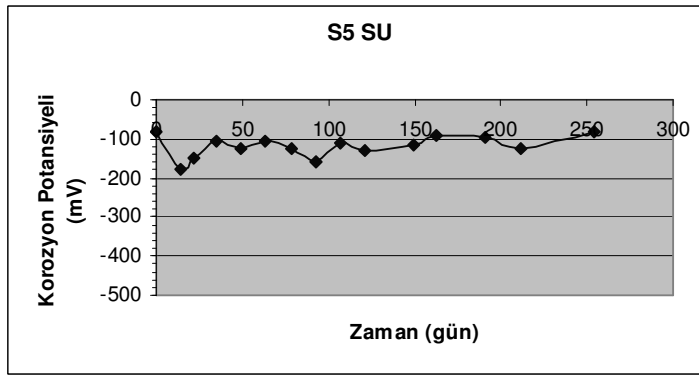
Şekil D.2 : Su Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



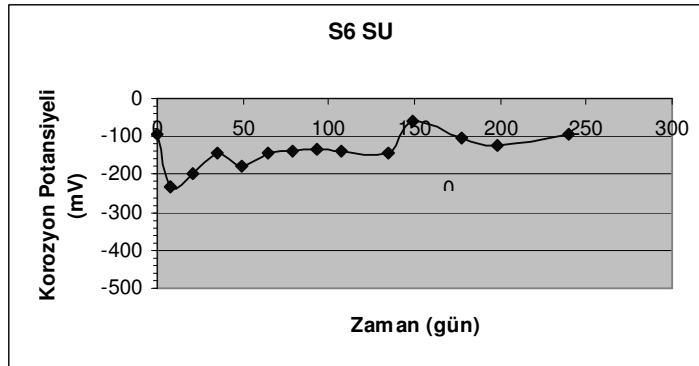
Şekil D.3 : Su Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



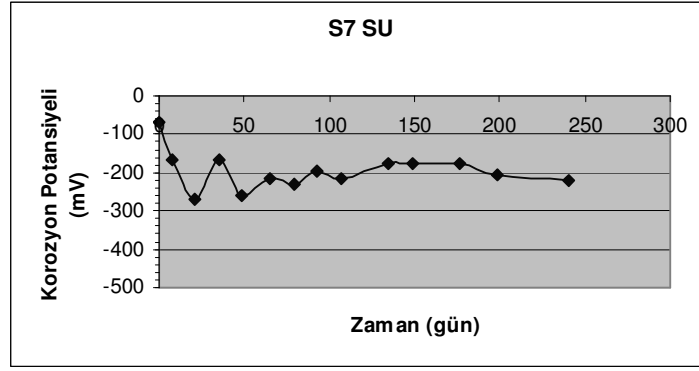
Şekil D.4 : Su Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



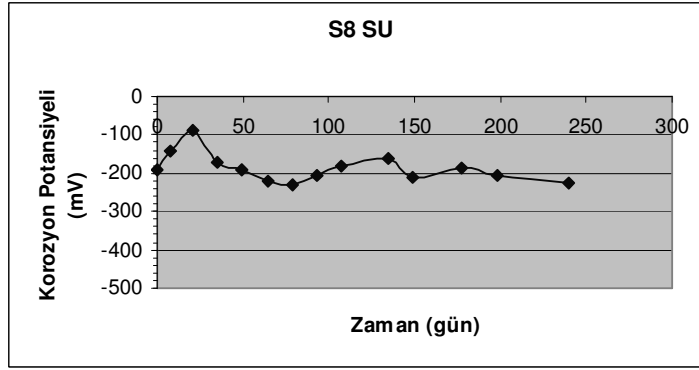
Şekil D.5 : Su Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



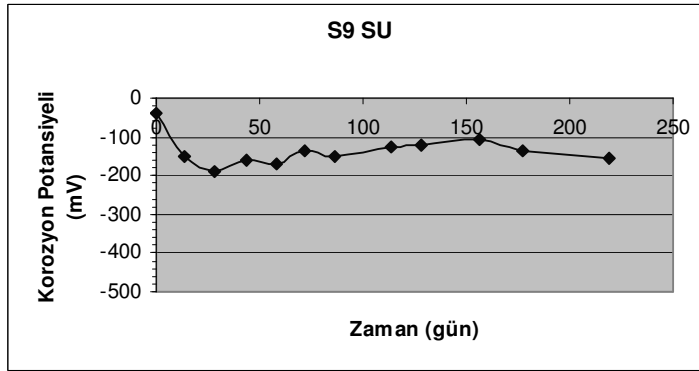
Şekil D.6 : Su Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



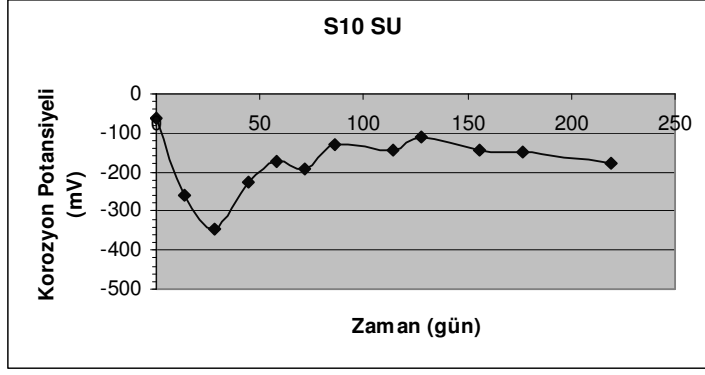
**Şekil D.7 :** Su Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



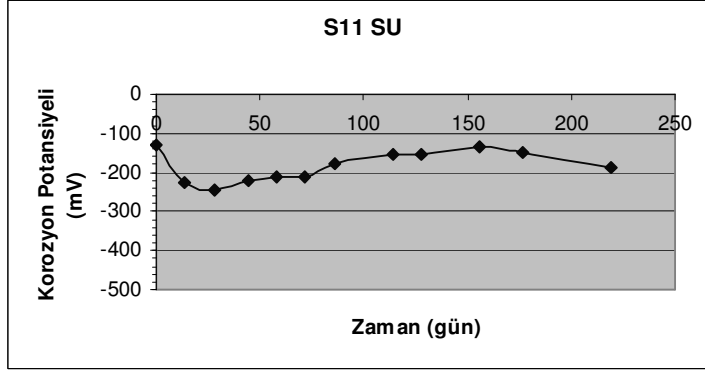
**Şekil D.8 :** Su Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



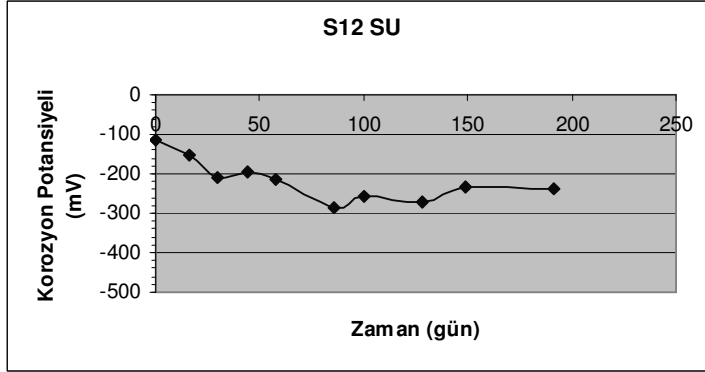
**Şekil D.9 :** Su Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



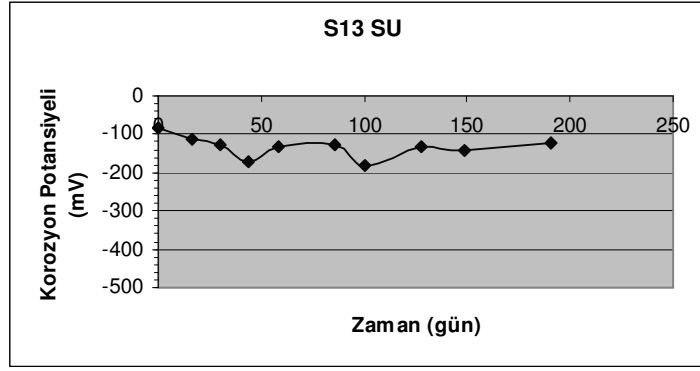
Şekil D.10 : Su Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



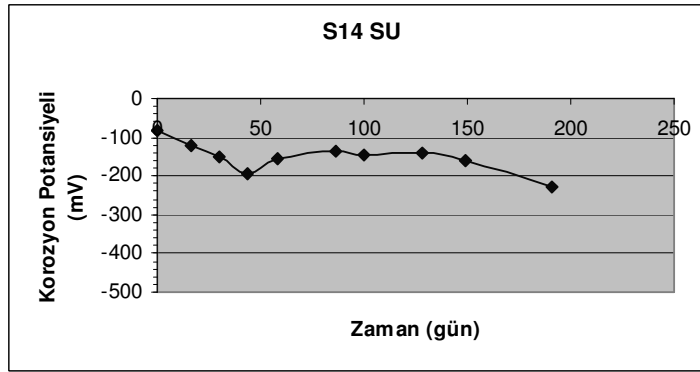
Şekil D.11 : Su Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



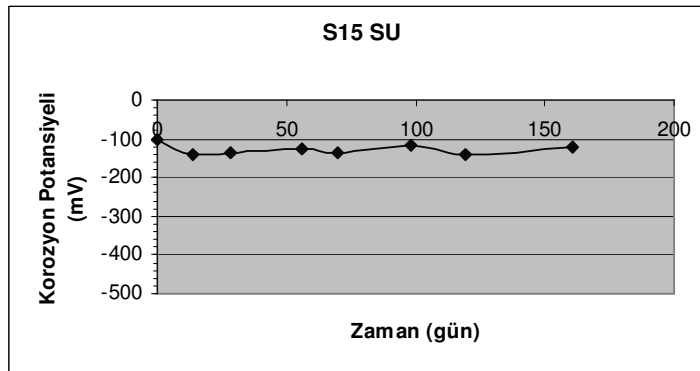
Şekil D.12 : Su Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



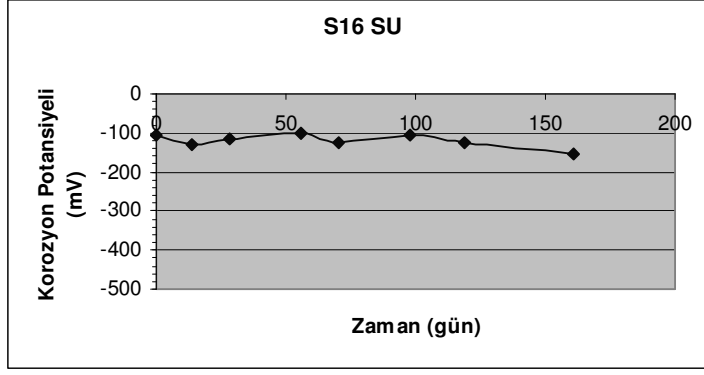
Şekil D.13 : Su Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



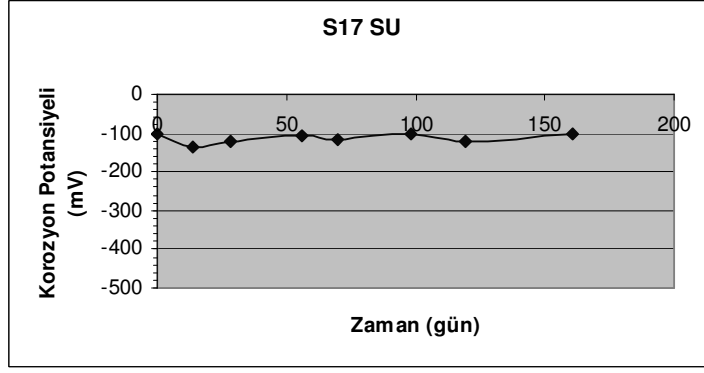
Şekil D.14 : Su Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



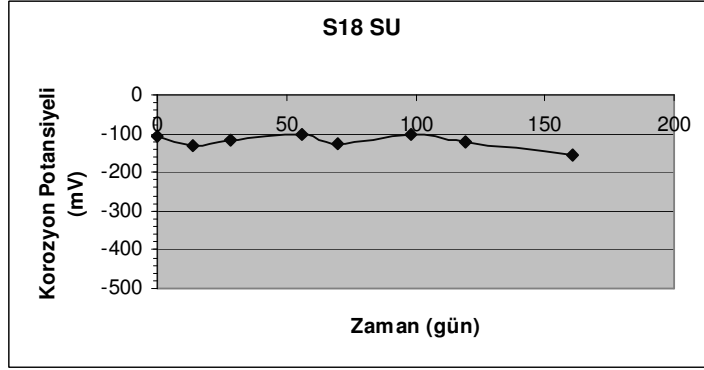
Şekil D.15 : Su Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



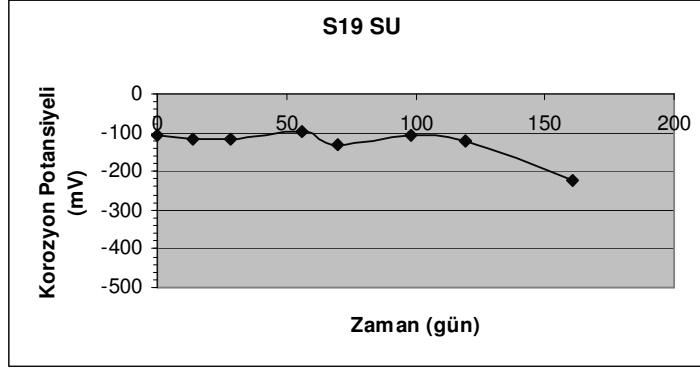
Şekil D.16 : Su Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



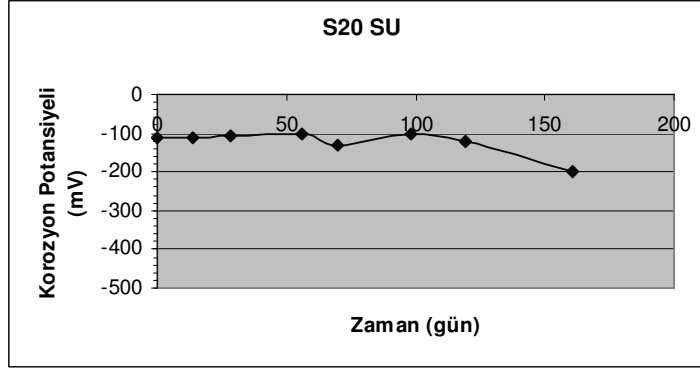
Şekil D.17 : Su Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



Şekil D.18 : Su Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi

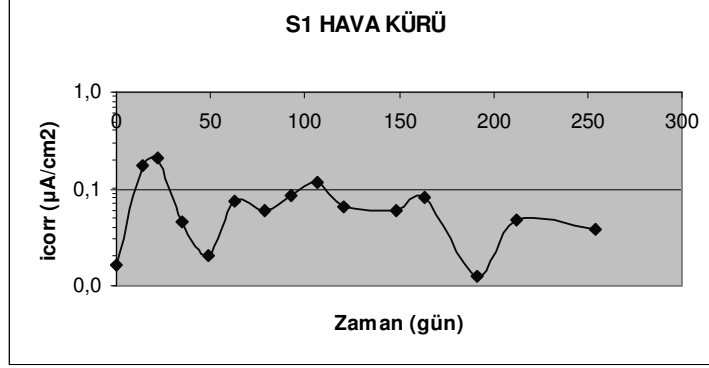


Şekil D.19 : Su Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi

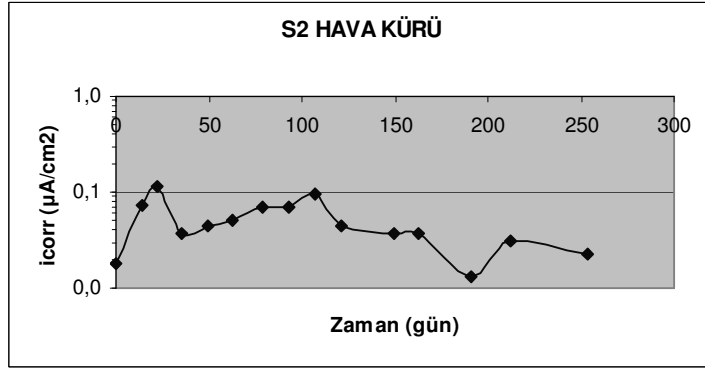


Şekil D.20 : Su Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi

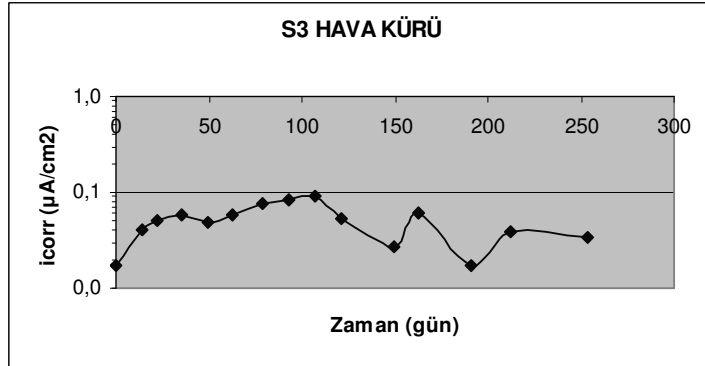
## Ek\_E



Şekil E.1 : Hava Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

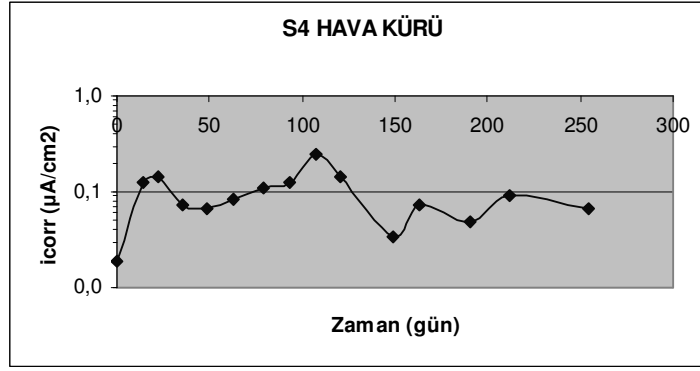


Şekil E.2 : Hava Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

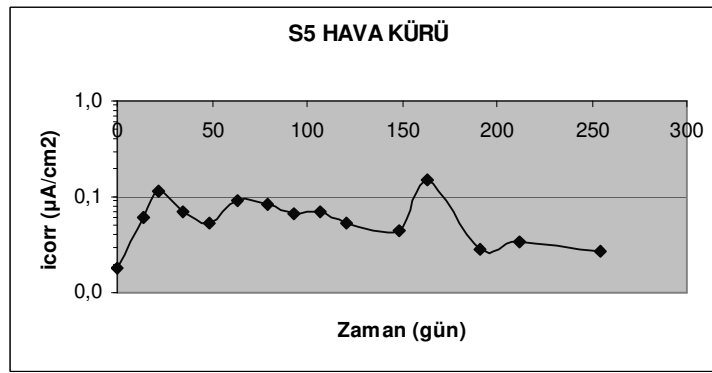


Şekil E.3 : Hava Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

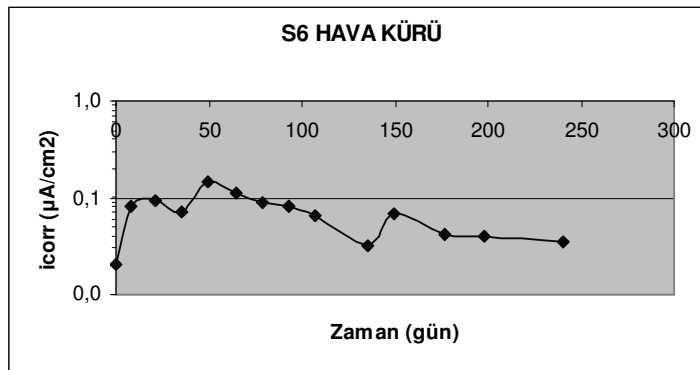




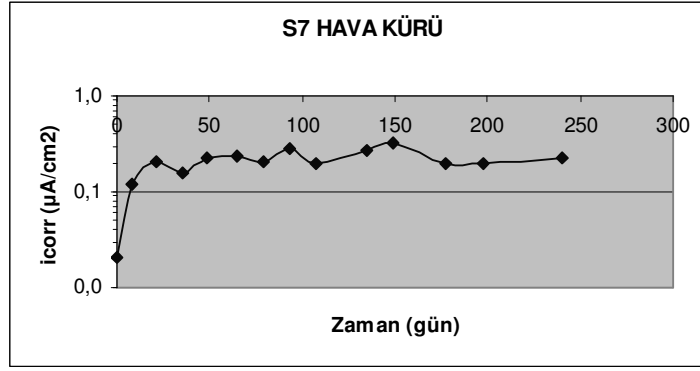
Şekil E.4 : Hava Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



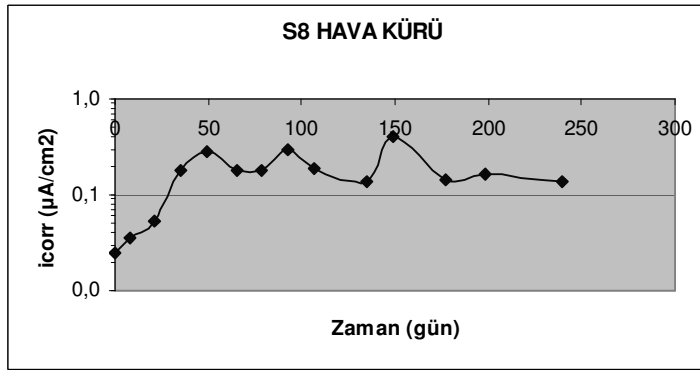
Şekil E.5 : Hava Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



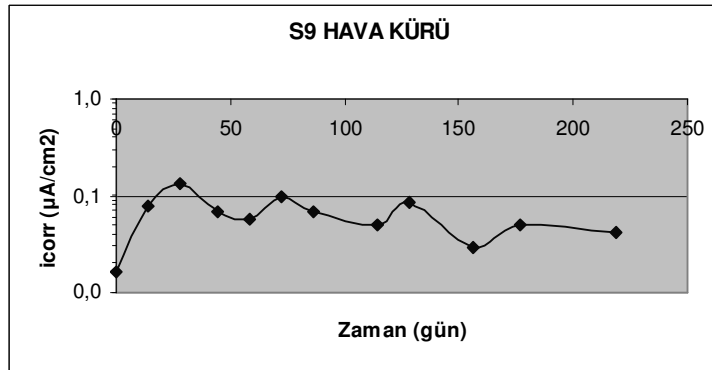
Şekil E.6 : Hava Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



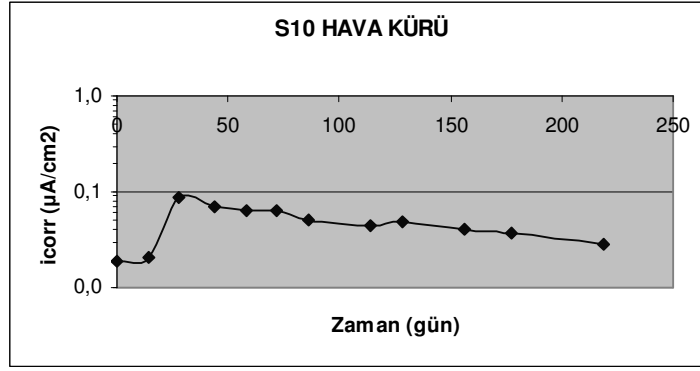
Şekil E.7 : Hava Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



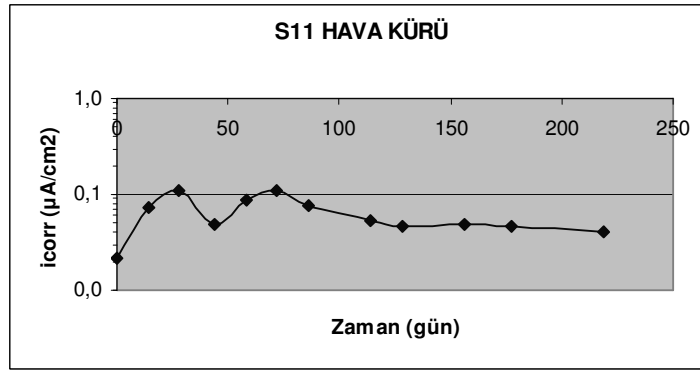
Şekil E.8 : Hava Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



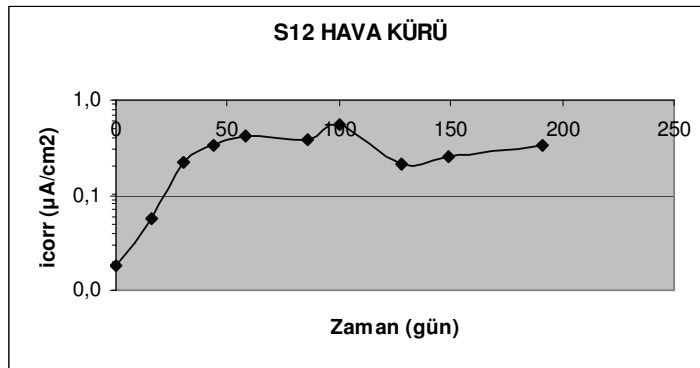
Şekil E.9 : Hava Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



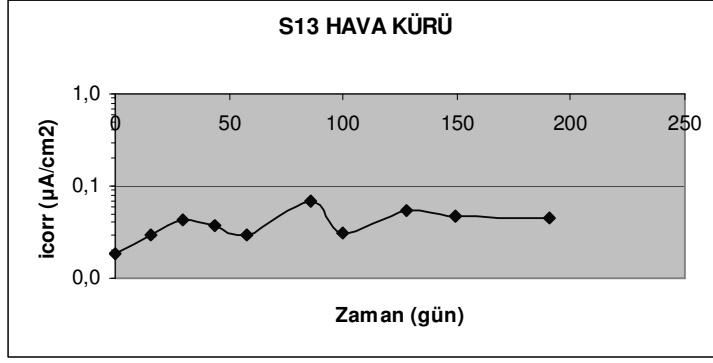
Şekil E.10 : Hava Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



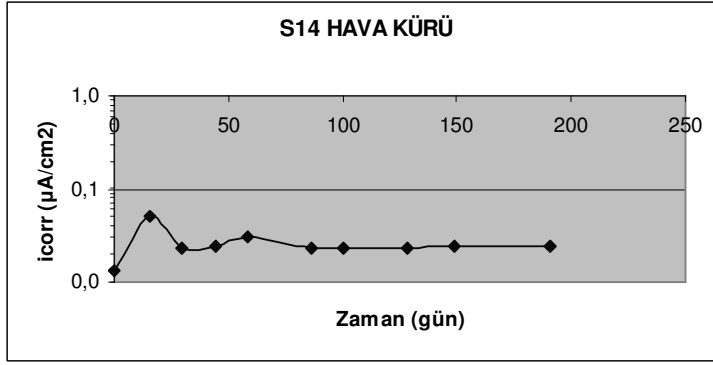
Şekil E.11 : Hava Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



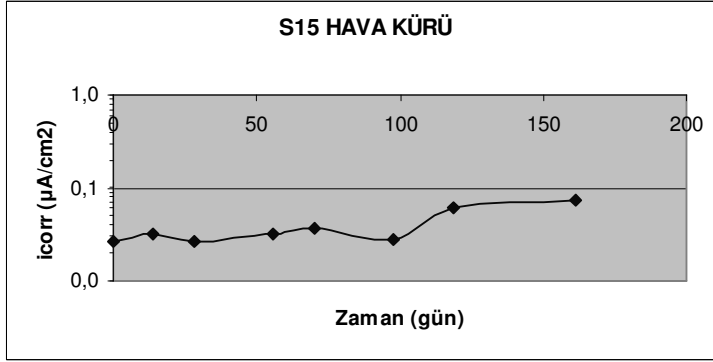
Şekil E.12 : Hava Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



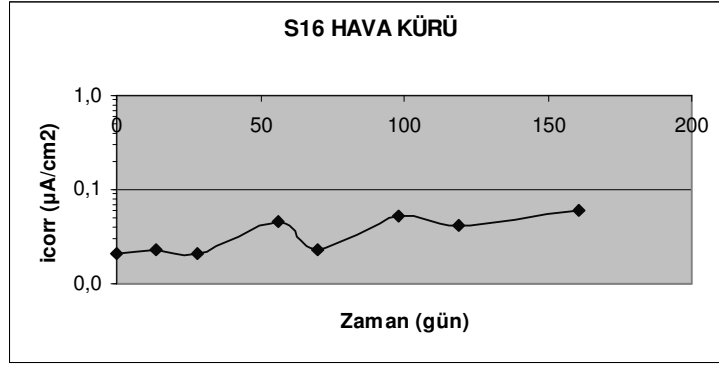
**Şekil E.13 :** Hava Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



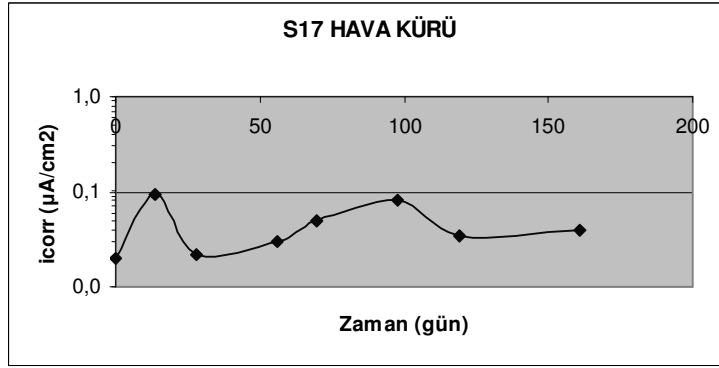
**Şekil E.14 :** Hava Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



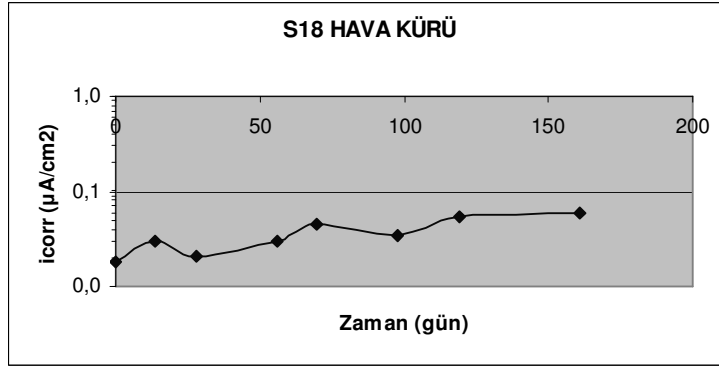
**Şekil E.15 :** Hava Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



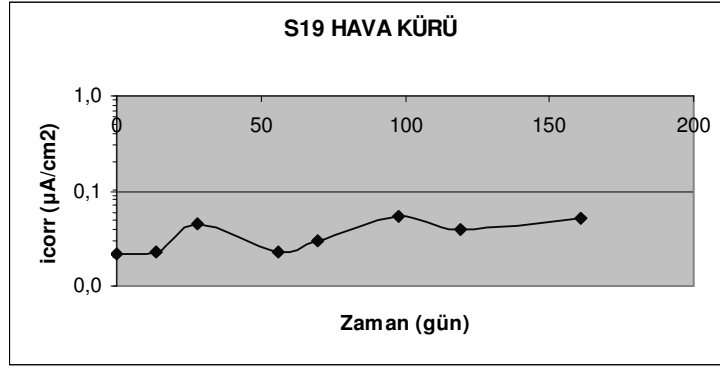
**Şekil E.16 :** Hava Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



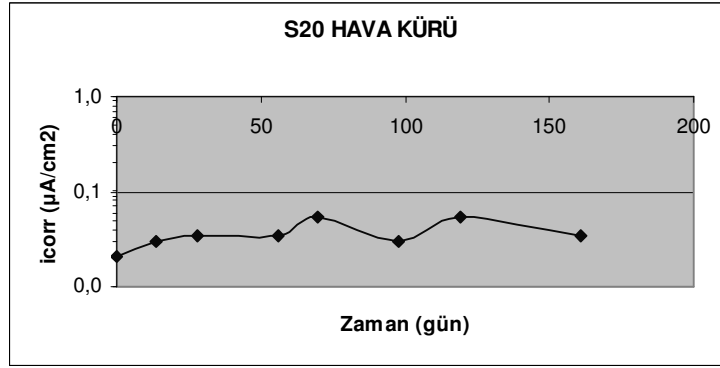
**Şekil E.17 :** Hava Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



**Şekil E.18 :** Hava Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

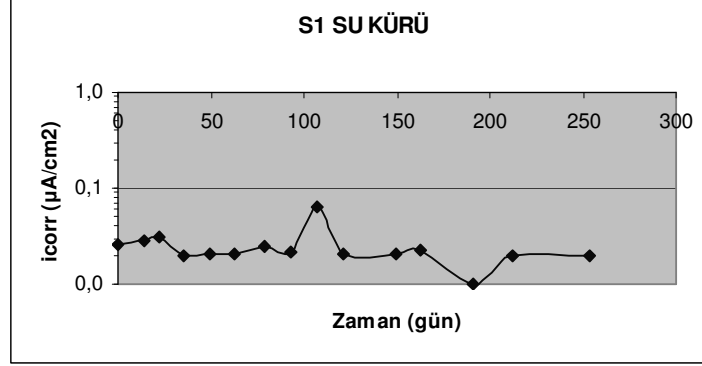


**Şekil E.19 :** Hava Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

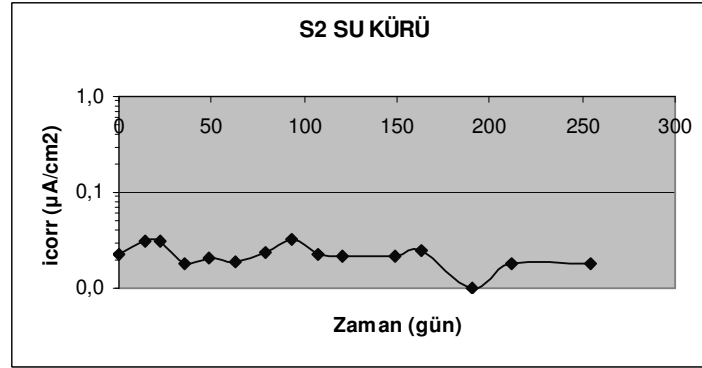


**Şekil E.20 :** Hava Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

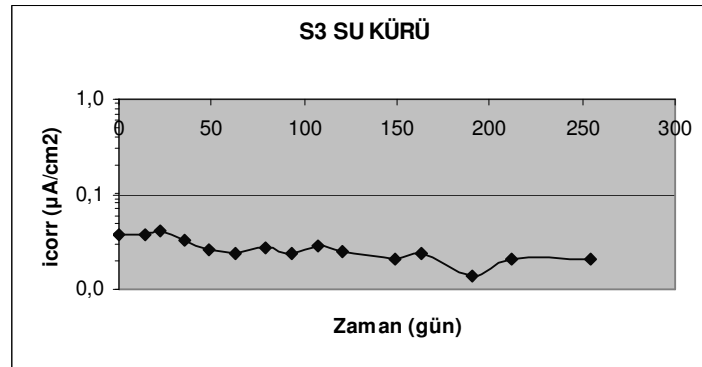
## Ek\_F



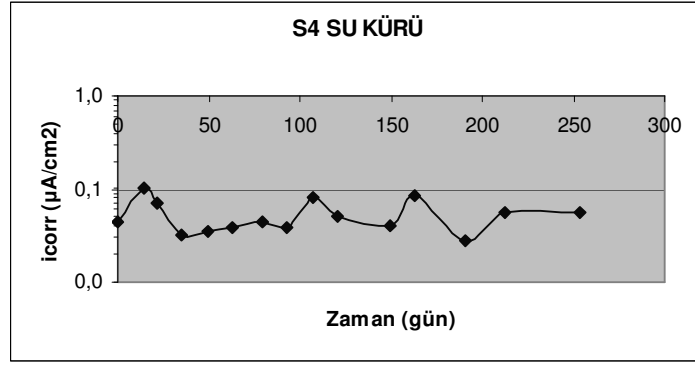
Şekil F.1 : Su Kürü Uygulanmış S1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



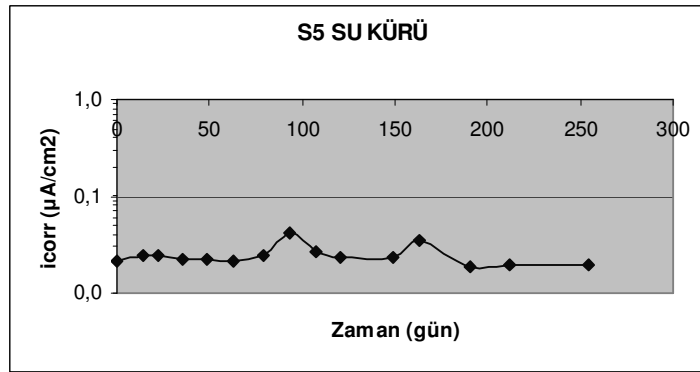
Şekil F.2 : Su Kürü Uygulanmış S2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



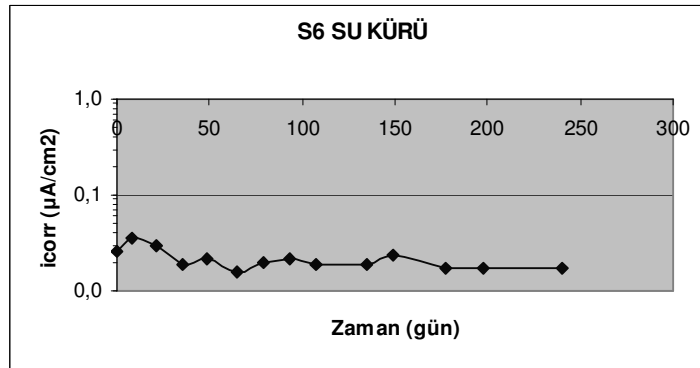
Şekil F.3 : Su Kürü Uygulanmış S3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



Şekil F.4 : Su Kürü Uygulanmış S4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

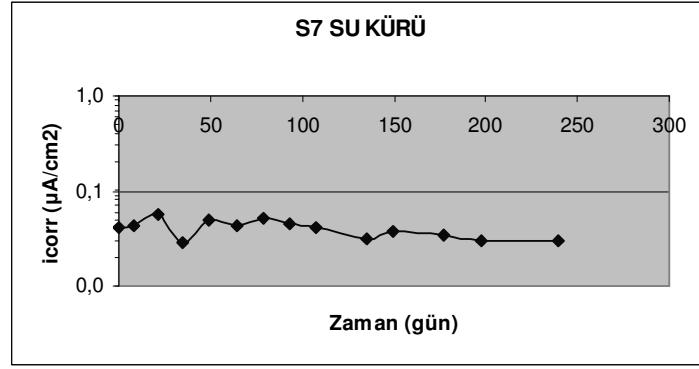


Şekil F.5 : Su Kürü Uygulanmış S5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

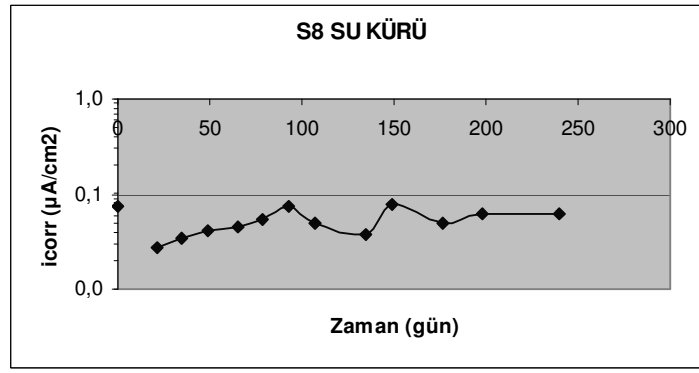


Şekil F.6 : Su Kürü Uygulanmış S6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

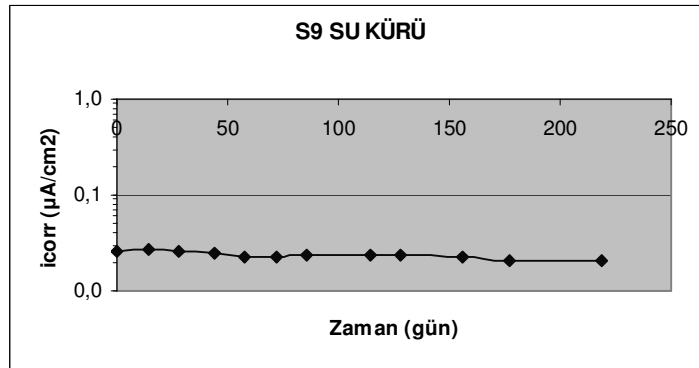




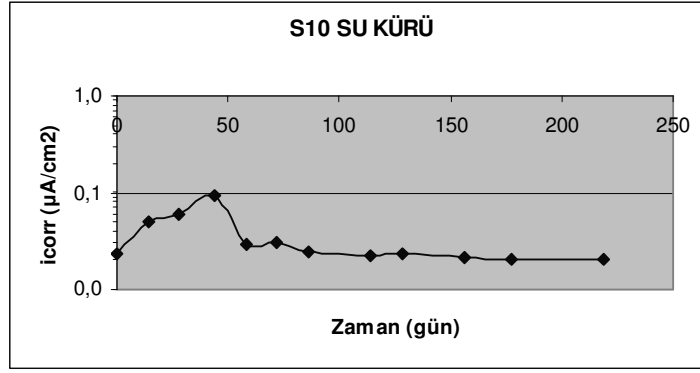
Şekil F.7 : Su Kürü Uygulanmış S7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



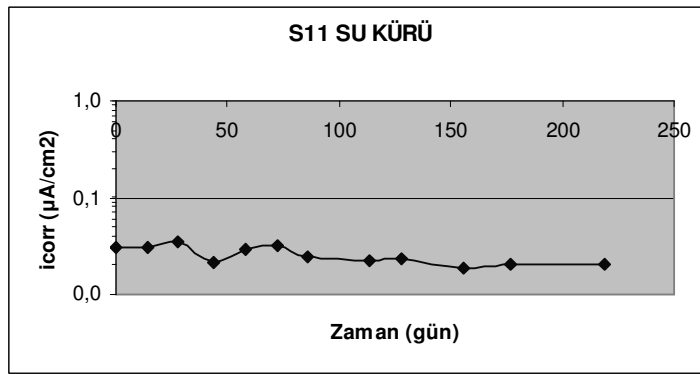
Şekil F.8 : Su Kürü Uygulanmış S8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



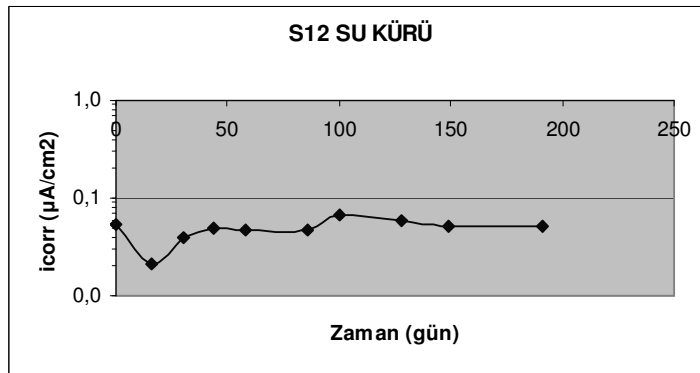
Şekil F.9 : Su Kürü Uygulanmış S9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



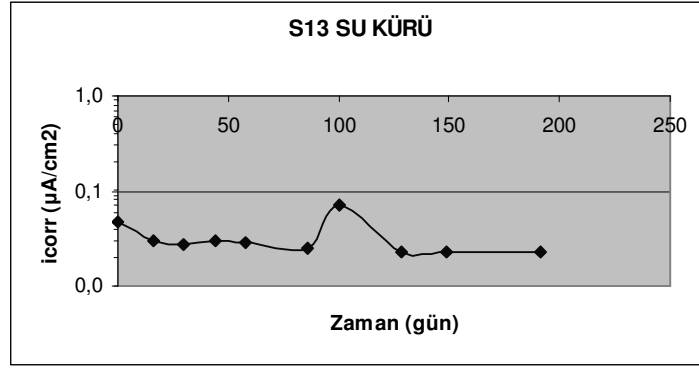
Şekil F.10 : Su Kürü Uygulanmış S10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



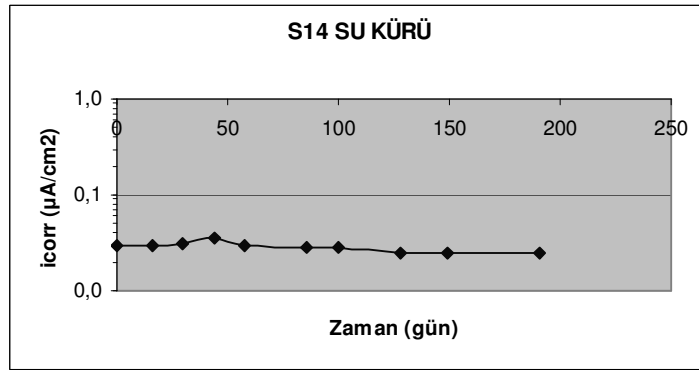
Şekil F.11 : Su Kürü Uygulanmış S11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



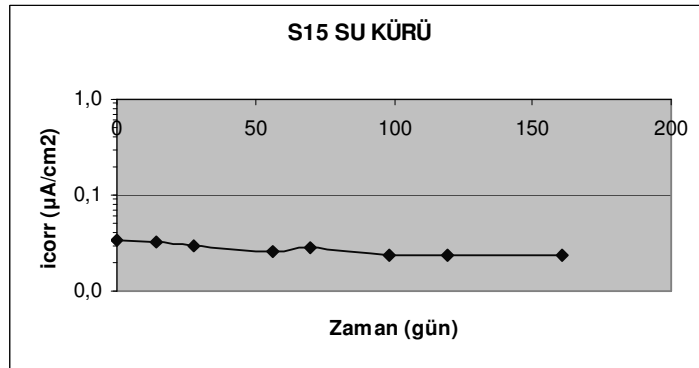
Şekil F.12 : Su Kürü Uygulanmış S12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



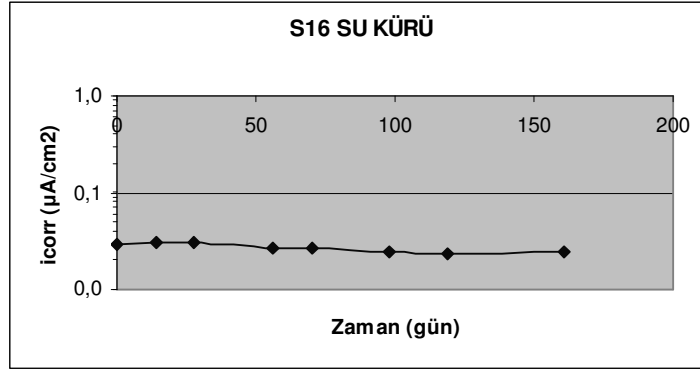
Şekil F.13: Su Kürü Uygulanmış S13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



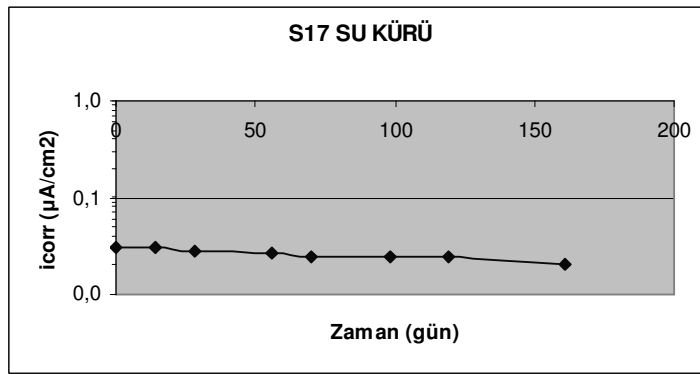
Şekil F.14 : Su Kürü Uygulanmış S14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



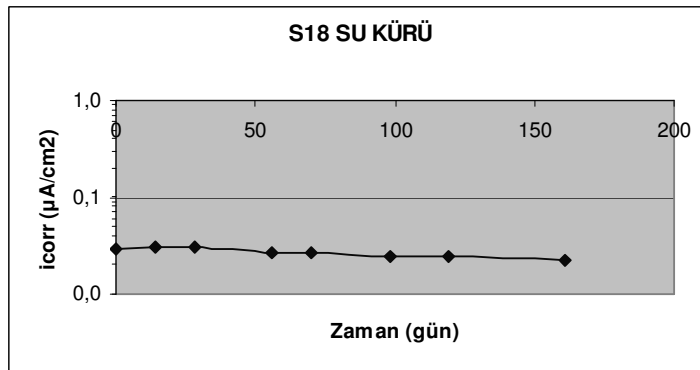
Şekil F.15 : Su Kürü Uygulanmış S15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



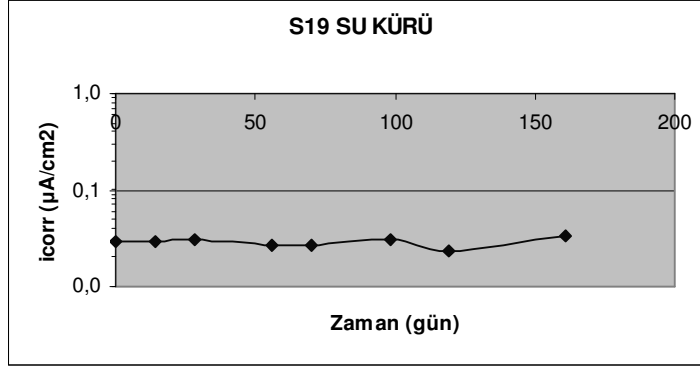
Şekil F.16 : Su Kürü Uygulanmış S16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



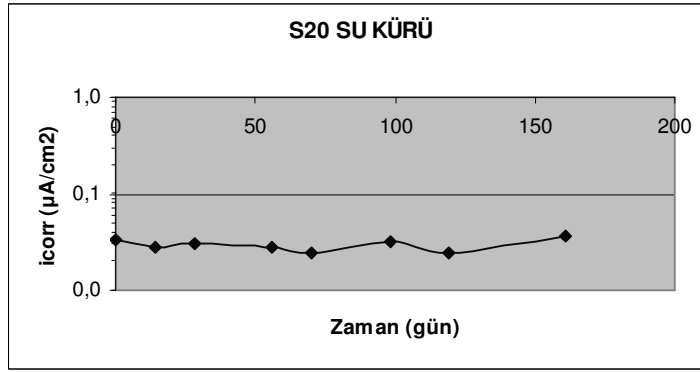
Şekil F.17 : Su Kürü Uygulanmış S17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



Şekil F.18 : Su Kürü Uygulanmış S18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



**Şekil F.19** : Su Kürü Uygulanmış S19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



**Şekil F.20** : Su Kürü Uygulanmış S20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

## **ÖZGEÇMİŞ**

31 Aralık 1981 tarihinde Ankara'da doğdu. İlköğrenimini Özel Aykan Koleji'nde, ortaöğrenimini TED Ankara Koleji Vakfı Özel Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı Yapı Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitime başladı. 2007 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı.