İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖĞÜTÜLMÜŞ GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BETONUN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş.Müh. Aziz Görkem SARAN

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖĞÜTÜLMÜŞ GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BETON DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aziz Görkem SARAN
501041014

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 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.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışmada, beni yönlendiren, bilgi ve tecrübeleri ile çalışmama büyük katkı sağlayan, danışman hocam Sayın Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL'a, gerek literatür çalışması esnasında, gerekse deneysel çalışmalar esnasında, bana yol gösteren ve zor durumlarda yardımlarına esirgemeyen Araştırma Görevlisi Ünal Anıl DOĞAN'a, deneysel çalışmalarımızı birlikte yürüttüğümüz ve sürekli ve bilgilerimizi paylaştığımız değerli arkadaşım İnşaat Yüksek Mühendisi Ersin Bora KURT'a, tüm çalışmaların esnasında ve daha önce yardımlarını esirgemeyen ve hep yanımda olan sevgili eşim Sevtap SARAN'a ve bugünlere gelebilmemde bana katkı sağlayan, öncelikli olarak Annem Fatma SARAN'a ve diğer tüm aile bireylerime sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs, 2007 Aziz Görkem SARAN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **viii**
SEMBOL LİSTESİ **xvii**
ÖZET **xix**
SUMMARY **xx**

1. GİRİŞ **1**
1.1 Betonu Oluşturan Malzemeler 2
1.1.1 Agregalar 2
1.1.2 Çimento 2
1.1.3 Su 3
1.1.4 Kimyasal Katkılar 4
1.2 Taze Beton Özellikleri 5
1.2.1 İşlenebilme ve Kıvam 5
1.2.2 Birim Ağırlık 7
1.3 Beton Dayanımı 8
1.3.1 Betonun Basınç Dayanımı 9
1.4 Betonun Durabilite (Dayanıklılık) Özellikleri 10
1.4.1 Betonun Geçirimlilik Özellikleri 11
1.4.2 Betonda Kılcal Su Emme Miktarının Belirlenmesi 13
1.4.3 Hızlı Klorür Geçirimliliği Yöntemi 16
1.5 Beton Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar (Puzolanlar) 18
1.5.1 Silis Dumanı 20
1.5.2 Uçucu Kül 21
1.5.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu 21
1.5.3.1 ÖGYFC'nin Üretimi 21
1.5.3.2 ÖGYFC'nin Kimyasal Kompozisyonu 24
1.5.3.3 ÖGYFC'nin Beton İçerisinde Kullanılması 26
1.5.3.4 ÖGYFC'nin Hidratasyonu 28
1.5.3.5 ÖGYFC'nin Beton Özelliklerine Etkisi 29

2. BETONARME DONATI KOROZYONU **30**
2.1 Korozyon Mekanizması 32
2.1.1 Elektrolitik Hücre 32
2.1.2 Polarizasyon 33
2.2 Betona Gömülü Çelik Donatının Korozyonu 35
2.3 Pasivasyon Tabakasının Bozulmasına Yol Açan Etkenler 36
2.3.1 Karbonatlaşma Etkisi ile Beton pH Değerinin Düşmesi 36

2.3.2 Klor Konsantrasyonun Etkisi 37
2.4 Korozyon Ölçüm Yöntemleri 38
2.4.1 Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Potansiyeli) 38
2.4.2 Polarizasyon Direnci (Lineer Polarizasyon) 40
2.4.3 Beton Direnci (Resistivite) 45
2.4.4 AC Empedans Yöntemi 47

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 48
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 48
3.1.1 Agregalar 48
3.1.2 Çimento 50
3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu 52
3.1.4 Kimyasal Katkı Maddesi 53
3.1.5 Donatı Çeliği 53
3.2 Merkezi Karma Tasarım Yöntemi 53
3.3 Beton Karışımları 55
3.4 Deneyler 58
3.4.1 Taze Beton Deneyleri 58
3.4.1.1 İşlenebilme (Slump Deneyi) 58
3.4.1.2 Birim Ağırlık Deneyi 58
3.4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri 58
3.4.2.1 Basınç Dayanımı 58
3.4.2.2 Hızlı Klorür Geçirimliliği Deneyi (ASTM 1202-97) 58
3.4.2.3 Kılcal Su Emme Deneyi 59
3.2.4.4 Lineer Polarizasyon, Yarı Hücre ve Özdirenç Ölçümleri
(Korozyon Hızı ve Potansiyel Ölçümleri) 60

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ 65
4.1 Taze Beton Deneyleri Sonuçları 65
4.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları 66
4.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçları 66
4.2.1.1. Hava Kürü Uygulanmış Betonlar 70
4.2.1.2. Su Kürü Uygulanmış Betonlar 70
4.2.2 Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları 71
4.2.2.1. Hava Kürü Uygulanmış Betonlar 73
4.2.2.2. Su Kürü Uygulanmış Betonlar 73
4.2.3 Kılcal Su Emme Deney Sonuçları 74
4.2.3.1. Hava Kürü Uygulanmış Betonlar 76

4.2.3.2. Su Kürü Uygulanmış Betonlar 77
4.2.4 Lineer Polarizasyon (Korozyon Hızı), Korozyon Potansiyeli (Yarı Hücre Potansiyeli) ve Özdirenç (Resistiviti) Deney Sonuçları 78
4.2.5. Optimizasyon 79

5. GENEL SONUÇLAR 82

KAYNAKLAR 85

EK A 88

EK B 108

EK C 128

EK D 142

ÖZGEÇMİŞ 156

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 1.1	Beton Karışım Suyunun İçerisinde Bulunabilecek Yabancı Maddelerin Sınır Değerleri ……..	4
Tablo 1.2	Değişik Kıvamlardaki Betonun Çökme Değerleri ……..	7
Tablo 1.3	TS EN 206 Standardına Göre Beton Kıvam Sınıfları ……	7
Tablo 1.4	Toplam Yük ile Klorür Geçirimliliği Arasındaki İlişki……..	18
Tablo 1.5	Yüksek Fırın Cüruflarının Komposizyonları % ….....	25
Tablo 1.6	ASTM standartlarına göre Katkı Maddesi olarak kullanılacak Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri	25
Tablo 1.7	ASTM standartlarına göre Katkı Maddesi olarak kullanılacak Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri	26
Tablo 2.1	Çelik Donatının Farklı Referans Elektrotlarına Göre Yarı Hücre Potansiyellerinin Değerlendirme Ölçütleri ……..	39
Tablo 2.2	Gecor ve 3LP Sonuçlarını Yorumlama Ölçütleri……..	44
Tablo 2.3	Betonun Özdirenci İle Korozyon Riski Arasındaki İlişki ……	47
Tablo 3.1	Agrega Özgül Ağırlıkları ……..	48
Tablo 3.2	Granülometri Deneyi Sonuçları ……	49
Tablo 3.3	Deneyde Kullanılan Agregaların Karışım Oranları ……..	50
Tablo 3.4	TS EN 196-3 ve TS EN 196-6 Standartlarına Göre Belirlenmiş Portland Çimentonun Fiziksel Özellikleri……..	50
Tablo 3.5	TS EN 196-2 Standardına Göre Belirlenmiş Portland Çimentonun Kimyasal Özellikleri …….	51
Tablo 3.6	Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı Değerleri (40x40x160 mm kalıplar, 1 kısım çim : 3 kısım CEN ref. Kumu, 0,50 su/çim)	51
Tablo 3.7	Deneyde Kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri …….....	52
Tablo 3.8	Deneyde Kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri ……	52
Tablo 3.9	Deneyde Kullanılan Kimyasal Katkıya Ait (Sika ViscoCrete -5W) Fiziksel Özellikler ……..	53
Tablo 3.10	Karışım Parametreleri ve Değişim Aralıkları ……	55
Tablo 3.11	Beton Karışım Oranları …….	56
Tablo 4.1	Taze Beton Deneyleri Sonuçları ve Kullanılan Kimyasal Katkı Oranları ……..	65
Tablo 4.2	Havada Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanımları ……..	66
Tablo 4.3	Suda Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanımları……	67
Tablo 4.4	Basınç Dayanımlarına Göre Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları, F –Değerleri ve Olasılık > F Değerleri……..	69
Tablo 4.5	Basınç Dayanımları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatiksel Değerleri ……..	69
Tablo 4.6	Hızlı Klorür Geçirimliliği Sonuçları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatiksel Değerleri ……..	71

Tablo 4.7 Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları …… 72
Tablo 4.8 Hızlı Klor Geçirimliliği Sonuçlarına Göre Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları, F –Değerleri ve Olasılık > F Değerleri …….. 72
Tablo 4.9 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları …….. 75
Tablo 4.10 Kılcallık Katsayısı Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatiksel Değerleri ……... 75
Tablo 4.11 Kılcallık Katsayılarına (k) Göre Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları, F –Değerleri ve Olasılık > F Değerleri …… 76
Tablo 4.12 Betona giren Malzemelerin Birim Fiyatları ……. 79
Tablo 4.13 Yapılan Maliyetsiz Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler …….. 80
Tablo 4.14 Yapılan Maliyetli Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler. 80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 : Taze betonda çökme miktarının ölçülmesi ……. 6
Şekil 1.2 : Kılcal Su Emme Deneyi Safhaları……... 14
Şekil 1.3 : Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Düzeneği ……... 18
Şekil 1.4 : Ham Demir Üretim Safhaları 22
Şekil 1.5 : Granülasyon Yöntemi..... 23
Şekil 1.6 : Peletleme Yöntemi..... 24
Şekil 1.7 : Cüruflu Çimento Üretiminin basit şematik gösterimi ……... 27
Şekil 2.1 : Tuutti'ye göre Korozyon Süreci..... 31
Şekil 2.2 : Basit Elektrolitik Hücre 33
Şekil 2.3 : Evans Diyagramının Basitleştirilmiş Şekli (Anot ve Katodun Polarizasyonu) 34
Şekil 2.4 : Betona Gömülü Çelikte Meydana Gelen Korozyon Mekanizması 35
Şekil 2.5 : Bakır-Bakır Sülfat Yarı Hücre Düzeneği …….. 39
Şekil 2.6 : Lineer Polarizasyon Eğrisi …… 42
Şekil 2.7 : 3LP Düzeneği ile Açık Devre Akımının Ölçülmesi ……. 43
Şekil 2.8 : 3LP Düzeneği ile Küçük Değişimler Meydana Getirilmiş Akımın Ölçülmesi …….. 43
Şekil 2.9 : Gecor Aletinin Çalışma Prensibin ……. 45
Şekil 2.10 : Wenner'in Geliştirdiği Beton Özdirenci (Resistivite) Ölçüm Yöntemi ……. 46
Şekil 3.1 : Beton Üretiminde Kullanılan Agrega Oranlarına Göre Karışım Eğrisi……. 49
Şekil 3.2 : Merkezi Karma Tasarım Yöntemi ……. 55
Şekil 3.3 : Üretilen Numuneler ve Boyutları …….. 57
Şekil 3.4 : Kılcal Su Emme Deneyi'nde Fagerlund'a Ait Grafik ……. 60
Şekil 3.5 : Kılcal Su Emme Deneyi'nde Elde Edilen Grafik …… 60
Şekil 3.6 : Korozyon Ölçümleri İçin Kullanılan Gecor 8 Düzeneği ……. 61
Şekil 3.7 : Ölçüm Düzeneğinin Ana Kısmı …….. 61
Şekil 3.8 : A Tipi Sensor (Yarı Hücre) ……. 62
Şekil 3.9 : B tipi Sensor (Yarı Hücre) …….. 63
Şekil 3.10 : Gecor 8 Aleti (A Tipi Sensor) ile Deney Esnasında Yapılan Korozyon Potansiyeli ve Korozyon Hızı Ölçümü …… 64
Şekil 3.11 : Gecor Aleti (B tipi Sensor) Deney Esnasında Yapılan Özdirenç Ölçümü …… 64
Şekil 4.1 : Hava Kürlerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimlilik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edilirliğin (D) Cüruf /Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi …….. 81

Şekil 4.2 : Su Kürlerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimlilik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edilirliğin (D) Cüruf /Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi …….. 81
Şekil A.1 : Hava Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 88
Şekil A.2 : Hava Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 88
Şekil A.3 : Hava Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 88
Şekil A.4 : Hava Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 89
Şekil A.5 : Hava Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 89
Şekil A.6 : Hava Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 89
Şekil A.7 : Hava Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 90
Şekil A.8 : Hava Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 90
Şekil A.9 : Hava Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 90
Şekil A.10 : Hava Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 91
Şekil A.11 : Hava Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 91
Şekil A.12 : Hava Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 91
Şekil A.13 : Hava Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 92
Şekil A.14 : Hava Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 92
Şekil A.15 : Hava Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 92
Şekil A.16 : Hava Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 93
Şekil A.17 : Hava Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 93
Şekil A.18 : Hava Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 93
Şekil A.19 : Hava Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 94
Şekil A.20 : Hava Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 94
Şekil A.21 : Hava Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 94

Şekil A.22 : Hava Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 95
Şekil A.23 : Hava Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 95
Şekil A.24 : Hava Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 95
Şekil A.25 : Hava Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 96
Şekil A.26 : Hava Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 96
Şekil A.27 : Hava Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 96
Şekil A.28 : Hava Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 97
Şekil A.29 : Hava Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 97
Şekil A.30 : Hava Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 97
Şekil A.31 : Hava Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 98
Şekil A.32 : Hava Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 98
Şekil A.33 : Hava Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 98
Şekil A.34 : Hava Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 99
Şekil A.35 : Hava Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 99
Şekil A.36 : Hava Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 99
Şekil A.37 : Hava Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 100
Şekil A.38 : Hava Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 100
Şekil A.39 : Hava Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 100
Şekil A.40 : Hava Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 101
Şekil A.41 : Hava Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 101
Şekil A.42 : Hava Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi 101
Şekil A.43 : Hava Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi 102
Şekil A.44 : Hava Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi 102

Şekil A.45 : Hava Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 102
Şekil A.46 : Hava Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 103
Şekil A.47 : Hava Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 103
Şekil A.48 : Hava Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 103
Şekil A.49 : Hava Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 104
Şekil A.50 : Hava Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 104
Şekil A.51 : Hava Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 104
Şekil A.52 : Hava Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 105
Şekil A.53 : Hava Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 105
Şekil A.54 : Hava Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 105
Şekil A.55 : Hava Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 106
Şekil A.56 : Hava Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 106
Şekil A.57 : Hava Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 106
Şekil A.58 : Hava Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 107
Şekil A.59 : Hava Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 107
Şekil A.60 : Hava Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 107
Şekil B.1 : Su Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …….. 108
Şekil B.2 : Su Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …….. 108
Şekil B.3 : Su Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 108
Şekil B.4 : Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 109
Şekil B.5 : Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 109
Şekil B.6 : Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 109
Şekil B.7 : Su Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …….. 110

Şekil B.8 : Su Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 110
Şekil B.9 : Su Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 110
Şekil B.10 : Su Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 111
Şekil B.11 : Su Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 111
Şekil B.12 : Su Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 111
Şekil B.13 : Su Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 112
Şekil B.14 : Su Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …….. 112
Şekil B.15 : Su Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 112
Şekil B.16 : Su Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 113
Şekil B.17 : Su Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 113
Şekil B.18 : Su Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 113
Şekil B.19 : Su Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 114
Şekil B.20 : Su Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 114
Şekil B.21 : Su Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 114
Şekil B.22 : Su Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …….. 115
Şekil B.23 : Su Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …… 115
Şekil B.24 : Su Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 115
Şekil B.25 : Su Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …….. 116
Şekil B.26 : Su Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 116
Şekil B.27 : Su Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 116
Şekil B.28 : Su Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …… 117
Şekil B.29 : Su Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …….. 117
Şekil B.30 : Su Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 117

Şekil B.31 : Su Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 118
Şekil B.32 : Su Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 118
Şekil B.33 : Su Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 118
Şekil B.34 : Su Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …….. 119
Şekil B.35 : Su Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …….. 119
Şekil B.36 : Su Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 119
Şekil B.37 : Su Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 120
Şekil B.38 : Su Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 120
Şekil B.39 : Su Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 120
Şekil B.40 : Su Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 121
Şekil B.41 : Su Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 121
Şekil B.42 : Su Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 121
Şekil B.43 : Su Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 122
Şekil B.44 : Su Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi …….. 122
Şekil B.45 : Su Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 122
Şekil B.46 : Su Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 123
Şekil B.47 : Su Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 123
Şekil B.48 : Su Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 123
Şekil B.49 : Su Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 124
Şekil B.50 : Su Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 124
Şekil B.51 : Su Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 124
Şekil B.52 : Su Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 125
Şekil B.53 : Su Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 125

Şekil B.54 : Su Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 125
Şekil B.55 : Su Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi …….. 126
Şekil B.56 : Su Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 126
Şekil B.57 : Su Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 126
Şekil B.58 : Su Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi ……. 127
Şekil B.59 : Su Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi ……. 127
Şekil B.60 : Su Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi …….. 127
Şekil C.1 : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 128
Şekil C.2 : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi …… 128
Şekil C.3 : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi …… 129
Şekil C.4 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 129
Şekil C.5 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 130
Şekil C.6 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 130
Şekil C.7 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 131
Şekil C.8 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 131
Şekil C.9 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 132
Şekil C.10 : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 132
Şekil C.11 : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi ……. 133
Şekil C.12 : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi ……. 133
Şekil C.13 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 134
Şekil C.14 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 134
Şekil C.15 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 135
Şekil C.16 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 135

Şekil C.17 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 136
Şekil C.18 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi…….. 136
Şekil C.19 : Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …… 137
Şekil C.20 : Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …… 137
Şekil C.21 : Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …… 138
Şekil C.22 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi ……. 138
Şekil C.23 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi ……. 139
Şekil C.24 : Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi……. 139
Şekil C.25 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi **……...** 140
Şekil C.26 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …….. 140
Şekil C.27 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …….. 141
Şekil D.1 : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi …….. 142
Şekil D.2 : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……... 142
Şekil D.3 : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi …….. 143
Şekil D.4 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi …… 143
Şekil D.5 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi …… 144
Şekil D.6 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 144
Şekil D.7 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 145
Şekil D.8 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 145
Şekil D.9 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi ……. 146
Şekil D.10 : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 146
Şekil D.11 : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi ……. 147
Şekil D.12 : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi ……. 147

Şekil D.13 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …… 148
Şekil D.14 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …… 148
Şekil D.15 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …… 149
Şekil D.16 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 149
Şekil D.17 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi …….. 150
Şekil D.18 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi…….. 150
Şekil D.19 : Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …….. 151
Şekil C.20 : Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …….. 151
Şekil D.21 : Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …….. 152
Şekil D.22 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi ……. 152
Şekil D.23 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi ……. 153
Şekil D.24 : Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi…….. 153
Şekil D.25 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi ……... 154
Şekil D.26 : Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …….. 154
Şekil D.27 : Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi …… 155

SEMBOL LİSTESİ

a_0	: Denklem sabiti.
a_1	: Dozaj (Toplam Bağlayıcı) katsayısı
a_2	: Su/Bağlayıcı katsayısı
a_3	: Cüruf/Bağlayıcı katsayısı
a_4	: $(\text{Dozaj})^2$ katsayısı
a_5	: $(\text{Su/Bağlayıcı})^2$ katsayısı
a_6	: $(\text{Cüruf/Bağlayıcı})^2$ katsayısı
a_7	: (Dozaj) x (Su/Toplam Bağlayıcı) katsayısı
a_8	: (Dozaj)x (Cüruf/Toplam Bağ.) katsayısı
a_9	: (Su/Top. Bağ.) x (Cüruf/Top.Bağ.) katsayısı
a_{10}	: $(\text{Dozaj})^3$ katsayısı
a_{11}	: $(\text{Su/Toplam Bağ.})^3$ katsayısı
a_{12}	: $(\text{Cüruf/Toplam Bağ.})^3$ katsayısı
A	: Numunenin Kesit Alanı (Suya temas eden)
A_k	: Aktif olarak korozyona uğrayan alan
B	: Orantı sabiti
BÖ	: Betonun özdirenci
CR	: Yıllık korozyon hızı
d	: Donatı Çapı
D	: Numune çapı
D_p	: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı
D_k	: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı
ΔE	: Polarizasyon değişimi (Potansiyel değişimi)
ΔI	: Akım değişimi
ΔQ	: Ağırlık değişimi
Ecorr = Ekor	: Korozyon potansiyeli
Ea	: Anodun yarı hücre potansiyeli
Ek	: Katodun yarı hücre potansiyeli
h	: Numune yüksekliği
I	: Elektrotlar arası akım
I_{kor}	: 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
M	: Korozyon testine sabit tutulan metalin atomik ağırlığı
MKT	: Merkezi karma tasarım
Q	: Yük (coulomb)
Q_n	: t_n anında numune ağırlığı
Q_0	: Numunenin ilk ağırlığı
R_p	: Polarizasyon direnci
r	: Korelasyon katsayısı
s	: Elektrot açıklıkları

t_d : Zaman (dakika)
t_n : Eşik zaman
w : Numune genişliği
V : Voltaj değeri
α : Merkezi karma tasarım aralık değeri
βa : Anodik Tafel sabiti
βc : Katodik Tafel sabiti
ε_e : Etkin porozite katsayısı
σ : Standart sapma
η_a : Anodun potansiyel değişimi
η_c : Katodun potansiyel değişimi
ρ : Metalin elektron sayısı

ÖĞÜTÜLMÜŞ GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BETON DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Beton ve betonarme elemanlar, karbonatlaşma, klor iyonları, asit etkisi, alkali agrega reaksiyonu, donma çözünme, sülfatlı sular vb. etkilerle, zamanla bozularak işlevselliğini yitirmektedir. Beton durabilitesi betonun bu tip dış etkenlere ve bu etkenler sonucu oluşacak bozulmalara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Dış etkenlerin betona nüfuz ederek zarar vermesi olayı, betonun boşluk yapısı ve dağılımı ile doğru orantılıdır. Günümüz beton teknolojisinin geldiği noktada yüksek dayanıma sahip ve yeterli işlenebilmeyi sağlayan beton daha kolay üretilebilmektedir. Beton özelliklerini geliştirmek için yapılan çalışmalar, betonun durabilitesi konusunda yoğunlaşmaktadır. Dış etkenler karşısında dayanıklılığı üst düzeyde beton üreterek, betonun daha uzun süre işlevselliğini koruyabilmesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Son yıllarda bu çalışmalar ışığında, daha geçirimsiz beton üretmek ve böylece betonun durabilite özelliklerini arttırmak için mineral katkı kullanımı yaygınlaşmıştır.

Yapılan bu çalışmada, beton üretiminde kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betonun durabilite özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, merkezi karma tasarım yöntemi kullanılarak, farklı karışım oranlarında 20 adet beton üretilmiş ve bu betonlara ait numuneler üzerinde basınç dayanımı, kılcal su emme, hızlı klorür geçirimliliği deneyleri ile lineer polarizasyon (korozyon hızı), yarı hücre (korozyon potansiyeli) ve özdirenç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kür koşullarının etkisini de araştırmak için, deneyde kullanılan tüm betonlara ait numuneler havada ve suda kür edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, su kürü numunelerinin hava kürü numunelerine göre çok daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Ortamda yeterli su bulunması durumunda, cüruf oranın belirli bir noktaya kadar artması ile betonun kılcal su emme ve hızlı klorür geçirimliliğinde düşüşler gözlenmiştir. Hava kürlerinde ortamda yeterli su bulunmamasına rağmen cüruf miktarının belirli bir noktaya kadar artması, betonun elektriksel direncini olumlu yönde etkilemiştir. Öte yandan betonların basınç dayanımları, cüruf oranının artması ile azalmıştır. Ayrıca yapılan korozyon ölçümlerinde, cüruf oranın artması ile su kürü uygulanmış betonlarda önemli ölçüde direnç artışları meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada genel olarak, cüruf oranın artması ile betonun durabilite özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir.

EFFECT OF GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG ON DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE

SUMMARY

Concrete and reinforced concrete can deteriorate by effect of carbonation, presence of chloride ions, acids, alkali-silica reaction, freezing-thawing, sulfate attack etc. with time. Durability of concrete is described as a kind of resistance against these kinds of detrimental effects. Deterioration of concrete occurs by penetrating of external factors in to concrete and this situation is related with the amount size and distribution of pores. Nowadays, concrete technology leads to produce high strength concretes and highly workable concretes more easily. For this reason studies for improving properties of concrete have concentrated on durability of concrete. The researchers have worked to produce more resistant concretes to external effects; thus, concrete can keep its functions for longer time. Recently, resulting of these studies, mineral admixtures have been used in concrete production to reduce the porosity and to improve durability properties.

In this study, the effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the durability properties of concrete have been investigated. For this purpose, 20 concrete mixtures with different compositions have been produced according to the Central Composite Design Method and compressive strength, rapid chloride permeability, capillarity as well as, linear polarization and half-cell potential methods and also resistivity of concrete have been measured. Half of specimens were kept in air and the other half in water to investigate the effect of curing on the mentioned properties. At the end of this study, water-cured specimens have showed better durability properties than air-cured ones. Better results of capillarity and rapid chloride permeability properties have been observed when the slag rate increases up to a particular rate, when there is adequate water. At air cured specimens, when slag rate is increased up to a particular rate, the electrical resistance of concrete was affected positively, in spite of there wasn't adequate water in the environment. This situation occurs due to the existence of slag in concrete. The compressive strength have decreased with increasing amount of slag. At corrosion measurements, increasing rate of slag caused significant increasing of resistance for water cured specimens. Consequence, improving durability properties of concrete was observed, when the slag rate was increased.

1. GİRİŞ

Beton; kum, çakıl ve/veya kırmataş gibi daneli malzemelerin, bağlayıcı madde olarak çimento, kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon) için gerekli su ile birlikte, gerektiğinde mineral ve/veya kimyasal katkılar da kullanılarak elde edilen bir malzemedir. Betonun karılmasından sertleşmeye başladığı ana kadar geçen süre içerisindeki, şekil verilebilir haline taze beton, sertleştikten sonraki katı haline ise sertleşmiş beton denilmektedir.

Beton; taze halde iken istenilen şeklin verilebilmesi, sertleşmiş halde ise dayanımı ve dayanıklılığı yüksek bir malzeme olmasından dolayı yapı mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle beton istenilen işlenebilmeyi sağlamalı, yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip olmalıdır.

Beton mekanik açıdan, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük olan gevrek bir malzemedir. Farklı yapılarda farklı amaçlar için kullanılan beton, zaman zaman çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Betonun çekme gerilmeleri karşındaki zayıflığını ortadan kaldırmak için beton ile çelik birlikte kullanılarak, betonarme elemanlar geliştirilmiştir. Betonun yüksek basınç dayanımı özeliği ve çeliğin yüksek çekme dayanımı özellikleri birleşerek dayanım yönünden kusursuz olan betonarme malzemelerin en önemli sorunu ise durabilite ve özellikle korozyon sürecidir.

Betonun dayanıklılığı (durabilite), betonun dış etkilere maruz kalması sonucu oluşacak bozulmalara karşı göstereceği dirençtir. Beton durabilitesi betonun boşluk yapısı ve betondaki boşlukların dağılımı ile doğrudan ilgilidir. Betona etki eden dış etkenler, beton matrisinde bulunan boşluklar ve agrega-hamur arayüzeyi vasıtası ile betona nüfuz etmektedir. Beton üretiminde su/çimento oranının yüksek olması ve betonun kötü yerleştirilmesi gibi etkilerle betonda boşluk oranı artmaktadır. Böylelikle betonun dış etkilere karşı direnci azalmaktadır. Beton dış etkiler sonucu bozularak işlevini yitirebilmekte ve sardığı çelik donatıları dış etkilere karşı koruyamamaktadır. Sonuç olarak çeliğin doğasında bulunan korozyon süreci meydana gelmekte ve bu süreç çelik donatıların kesitlerinin azalmasına ve bunun

sonucunda yük taşıma kapasitelerinin kaybolmasına, ayrıca paspayı betonunun çatlamasına yol açmaktadır.

Son yıllarda beton ile ilgili yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu beton durabilitesi üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalara göre betonda kimyasal kullanımıyla daha az su miktarında istenilen işlenebilmeyi sağlamak mümkündür. Bunun yanında mineral katkı kullanımı ile beton içerisindeki boşluklar azalmakta ve betonun dış etkilere karşı direnci artmaktadır. Beton boşluklarının azalması betonun durabilitesi açısından önemli faydalar sağlamakta ve oluşabilecek olumsuz etkiler önlenebilmektedir.

1.1. Betonu Oluşturan Malzemeler

1.1.1. Agregalar

Normal ağırlıklı beton içerisinde kullanılan daneli malzemeler (agregalar) genellikle; kum, çakıl ve/veya kırmataştır. Betonun yaklaşık %75'ini agregalar oluşturmaktadır. Agregalar ince ve iri agrega olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Türk standartları tanımlamasına göre, elendiğinde 4.0 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçebilen boyutlardaki agregaya "ince agrega", ve bu elek üzerinde kalan agregaya "iri agrega" denilmektedir [1].

Agregaların beton içerisinde kullanılmasıyla, çimento hamurunun zamanla göstereceği büzülme (rötre) sınırlandırılıp, betonun hacim sabitliği korunmaktadır [2]. Ayrıca beton içerisinde kullanılan agregaların dayanımının yüksek olması, beton dayanımının yüksek olmasına katkıda bulunmaktadır. Beton içerisinde kullanılacak agregaların çeşitli özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu özellikleri tane boyu dağılımı, maksimum tane büyüklüğü, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık, tane şekli, agrega içindeki yabancı ve zararlı maddelerin türü ve miktarı, dona dayanıklılık, aşınmaya dayanıklılık, dayanım, elastiklik modülü, ısısal özellikler vb. şeklinde sıralayabiliriz [1].

1.1.2. Çimento

Beton içerisinde bağlayıcı olarak birçok malzeme kullanılmaktadır. Geçmişte yağlı kireç, muhtelif tür doğal çimentolar, alçı, muhtelif puzolanlar kullanılmıştır. Günümüzde ise bağlayıcı olarak en çok kullanılan malzeme Portland çimentosudur.

Betonun oluşturulmasında çimento hamurunun işlevi, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplamak, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve agrega tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır[1]. Çimento kil, kalker ve demir oksitin döner fırında 1400^{o}C'de pişirildikten sonra, oluşan klinkerin alçı taşı ile birlikte değirmende 90 μm inceliğine kadar öğütülmesi sonucunda oluşur [3]. Çimento içerisinde bulunan trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum alüminat (C_3A) ve tetrakalsiyum alümino ferrit (C_4AF) ana bileşenler, su ile karıştırılan çimentonun hidrate olmasını sağlar. Çimentolar TS EN 197-1 standardına göre şu şekilde gruplandırılabilir.

1- Portland Çimentoları (CEM I)

2- Portland Kompoze Çimentoları (CEM II)

3- Portland Yüksek Fırın Cüruflu Çimento (CEM III)

4- Puzolanik Çimento (CEM IV)

5- Kompoze Çimento (CEM V)

1.1.3. Su

Beton karışımının hazırlanmasında kullanılacak olan suyun uygun kalitede olması, beton özelliklerini olumsuz olarak etkileyecek yabancı maddeleri içermemesi gerekmektedir. Beton teknolojisinde su; karışım suyu ve kür suyu olmak üzere farklı işlevlere sahiptir. Beton karışım suyu içerisinde beton özelliklerini etkileyecek çok sayıda yabancı madde bulunmaktadır ve saf su elde etmek oldukça güçtür. Bunun yerine kullanılacak suyun içerisinde bulunabilecek yabancı maddelerin miktarlarının sınırlandırılmasına gidilmiştir. Tablo 1.1'de beton içerisinde bulunabilecek yabancı maddelerin izin verilen miktarları yer almaktadır.

Tablo 1.1 : Beton Karışım Suyunun İçerisinde Bulunabilecek Yabancı Maddelerin Sınır Değerleri [1]

Yabancı Madde	**Bulunabilecek Maksimum Konsantrasyon**
Kil ve Silt gibi katı maddeler (suyun bulanıklılığı)	0.2
Yağ	Çimento Ağırlığının %2'si
Yosunlu Maddeler	%0.05 – 0.1
Şeker	%0.05
Kalsiyum ve Magnezyum Bikarbonatlar	%0.04
Alkali Karbonatlar ve Bikarbonatlar	%0.1
Kalsiyum Klorür	Çimento Ağırlığının %2'si
Sodyum Klorür	%2.0
Magnezyum Klorür	%4.0
Sodyum Sülfat	%1.0
Magnezyum Sülfat	%4.0
Fosfat, Arsenat, Borat	%0.05
Demir Tuzları	%4.0
Hidroklorik ve Sülfirik Asitler	%1.0
Sodyum Hidroksit	Çimento Ağırlığının %0.5'i
Potasyum Hidroksit	Çimento Ağırlığının %1.2'si

1.1.4. Kimyasal Katkılar

Beton teknolojisinde kimyasal katkı maddeleri denildiğinde, "su içerisinde çözünme gösteren katkı maddeleri" anlaşılmaktadır. Hava sürükleyici katkı maddeleri ise su içerisinde çözünmediklerinden dolayı bazı kaynaklarda kimyasal katkı maddelerinde farklı bir grupta sınıflandırılmaktadırlar [1]. Kimyasal katkılar; su azaltıcılar (akışkanlaştırıcılar), priz geciktiriciler, priz hızlandırıcılar, su azaltıcı ve priz geciktirirciler, su azaltıcı ve priz hızlandırıcılar, yüksek miktarda su azaltıcı ve priz geciktiriciler ve hava sürükleyiciler olarak özetlenebilir. Söz konusu kimyasal katlılar beton içerisinde çok az miktarlarda (çimento ağırlığının yaklaşık %1 - %2'si kadar katılarak) kullanılmalarına rağmen, beton özelliklerine olan etkileri büyüktür. Kimyasal katkı maddeleri; beton içerisinde kullanılan karışım suyunu azaltmak, priz

sürelerini uzatmak veya kısaltmak, karışım suyu miktarını değiştirmeksizin işlenebilirliği arttırmak, beton içerisine hava kabarcıkları sürüklemek gibi betonun birçok özelliğini etkilemektedirler. Bu katkı maddeleri doğrudan betona katılabildiği gibi, beton karışım suyuna da eklenebilmektedirler. Katkı maddelerinin beton içerisinde kullanıldıkları miktarlar önemlidir. Çünkü bu maddeler gereğinden fazla kullanıldıklarında beton özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedirler.

1.2. Taze Beton Özellikleri

Çimento, su, agrega ve yardımcı katkıların bir arada karılmasıyla elde edilen beton başlangıçta şekil verilebilir, sıvımsı bir kıvamdadır. Zamanla beton içerisinde gelişen hidratasyon olayı sonucu beton sertleşir ve katı bir hal alır. Taze halde bulunan betonun işlenebilir olması gerekir. İşlenebilme, kolay yerleşebilme yanında ayrışmama ve homojen olma özelliklerini birlikte taşır.

1.2.1. İşlenebilme ve Kıvam

Taze beton özellikleri arasında en önemli olanı işlenebilmedir. İşlenebilme; taze betonun, kullanılacağı amaca göre, yerleştirilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilmesi amacıyla gereken akıcılıkta olduğunu gösteren bir değerdir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan beton, yerleştirme, sıkıştırma ve düzeltme işlemleri istenilen düzeyde olmadığında, yeterli dayanımı ve dayanıklılığı göstermez.

İşlenebilme özelliği, betonun yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir.

- Taze beton kütlesinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı)
- Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık)
- Betonu oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış olmaları, böylece segregasyona karşı göstereceği direnç (kohezyon)
- Yerleştirmeyi ve yüzeyin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık [1]

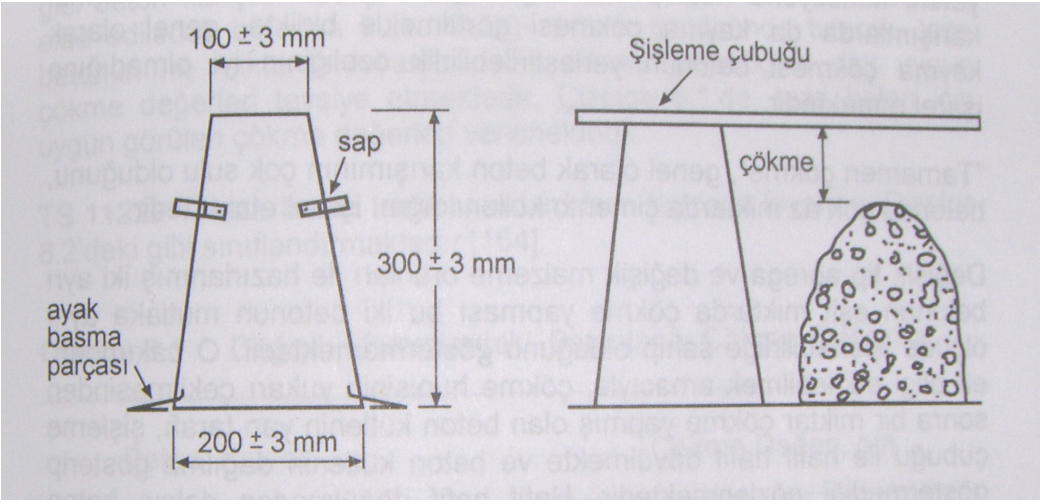
İşlenebilme, betonun kullanılacağı yapı, betonun taşınması ve yerleştirilmesi ve betonun kütlesi ile farklılıklar gösteren bir kavramdır. Örnek olarak, su miktarı az olan taze beton, kütle betonu olarak kullanıldığında yeterli işlenebilmeyi sağlamasına

rağmen, aynı betonun dar bir kalıp içerisinde kullanılması halinde yeterince işlenebilirlik sağlanamaz.

"Kıvam" kavramı ise betonun akıcılık derecesinin bir ölçüsüdür. Kıvamın yüksek olması betonun işlenebilirliğini belirli bir noktaya kadar olumlu yönde etkilemektedir. Fakat çok yüksek kıvama sahip olan betonların ayrışmaya (segregasyona) uğramaları sebebiyle işlenebilirlik olumsuz etkilenebilmektedir. Uygulamada çoğu zaman beton kıvamı işlenebilirliliği belirlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Taze betonun işlenebilirliliğini saptamak amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en önemlileri çökme deneyi, vebe deneyi, sıkıştırma faktörü deneyi, akıcılık deneyi (Sarsma Tablası Deneyi)'dir.

Çökme Deneyi (Slump Deneyi): İşlenebilirlik deneyleri arasında en çok kullanılan deney çökme deneyi (slump deneyi) 'dir. TS EN 12350-2 ve ASTM C 143 standartlarında belirtilen çökme deneyleri birbirleri ile aynıdır. Her iki standarda da 20 cm taban çapı, 10 cm üst çapı olan, 30 cm uzunluğunda metalden yapılmış kesik koni ve boyu 60 cm, çapı 1,6 cm olan ucu yuvarlatılmış bir çelik çubuk kullanılır. Beton huni içerisine 3 tabaka halinde koyulur. Her tabak şişleme çubuğu ile ayrı ayrı 25'er kez şişlenmelidir. En üst tabaka şişlendikten sonra, kalıbın üst kısmı mala ile düzeltilir. Bu işlemlerden sonra huni saplarından tutularak yavaşça yukarı çekilir. Kalıptan kurtulan beton belirli bir çökme gösterdikten sonra, ilk konumuna göre çökme miktarı (slump) ölçülür. Şekil 1.1'de çökme hunisi ve çökme yöntemi ile betonun kıvamının ölçülmesi gösterilmektedir.



Şekil 1.1: Taze Betonda Çökme Miktarının Ölçülmesi

Çökme deneyi kıvamı az olan betonlar için uygun bir deney değildir. Çökme miktarı 2,5 cm'den az olan betonlar için, sıkıştırılması işleminde pratikte vibratör kullanıldığından, bu tip betonların kıvamının veya işlenebilirliliğinin bulunabilmesi için Vebe Deneyi gibi başka bir deney kullanılması gerekmektedir.

Genel olarak aynı çökme değerine sahip betonların, benzer ölçüde işlenebilirlik göstereceği kabul edilmektedir. TS 802 nolu Türk Standardı gibi karışım hesap esaslarını anlatan birçok standart, betonun ne miktarda kıvama sahip olması gerektiğine dair çökme değerleri tavsiye etmektedir. Bu değerler Tablo 1.2 ve 1.3'de verilmiştir.

Tablo 1.2: Değişik Kıvamlardaki Betonun Çökme Değerleri

BETON KIVAMI	ÇÖKME DEĞERİ, CM
Aşırı Kuru	….
Çok Kuru	….
Kuru	0-2,5
Kuru-Plastik	2,5-5,0
Plastik	7,5-10,0
Akıcı	15,0-17,5

Tablo 1.3: TS EN 206 Standardına Göre Beton Kıvam Sınıfları

KIVAM SINIFI	ÇÖKME DEĞERİ, cm
S1	0-5
S2	5-10
S3	10-16
S4	16-22
S5	22≤

1.2.2. Birim Ağırlık

Taze betonun birim hacminin ağırlığı olarak tanımlanan birim ağırlık kavramı, genellikle kg/m³ veya ton/m³ olarak ifade edilir. Betonun birim ağırlığı, beton içerisinde yer alan malzemelerin özgül ağırlıkları ve beton içerisinde bulunan

havanın hacmi ile doğrudan ilişkilidir. Taze betonun, benzer malzemelerle ve aynı oranlarda üretilmiş farklı betonlarla benzer birim ağırlık göstermesi gerekmektedir.

1.3. Beton Dayanımı

Beton kullanıldığı duruma göre, farklı yönlerde ve büyüklüklerde kuvvetlerin (yüklerin) etkisi altında kalmaktadır. Beton elemanlar, bu yükler etkisinde, çok küçük miktarlarda şekil değiştirerek, yüklerin etkilerine karşı koyacak şekilde tasarlanırlar. *Beton dayanımı*, betonun üzerine gelen yüklerin etkisi ile meydana gelecek şekil değiştirme ve kırılmalara karşı direnç gösterme kabiliyetidir. Beton dayanımının yüksek olması, çimento hamurunun dayanımına, agrega dayanımına ve çimento hamuru ile agrega arasında meydana gelen aderansa bağlıdır. Agregaların yeterli dayanımda oldukları kabul edilirse, çimento hamurunun dayanımı ve agregalarla yaptığı aderansın önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Beton dayanımını olumsuz yönde etkileyen en önemli faktör, beton içerisinde bulunan boşluklardır. Çünkü boşlukların çevresinde, betonun kırılmasına yol açabilecek gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Beton dayanımı etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1- Su / Bağlayıcı Oranı (su/bağlayıcı oranı yükseldikçe, beton içerisinde daha fazla boşluk oluşmakta ve beton dayanımı daha düşük olmaktadır.)

2- Karma suyu kalitesi

3- Çimento Özellikleri (çimentonun kimyasal özellikleri ve inceliği çimentonun hidratasyon hızını ve dayanımını etkilemektedir.)

4- Agrega Özellikleri (agreganın tane boyut dağılımı, en büyük tane boyutu, tane şekli, tanelerin yüzey dokusu, dayanımı ve agregada bulunabilecek zararlı maddelerin varlığı)

5- Betona uygulanan karıştırma, taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri

6- Kür koşulları ve betonun yaşı [1].

Beton üzerine etkiyen yükler basınç, çekme, kayma ve eğilme gibi gerilmeler yaratabilmektedir.

1.3.1. Betonun Basınç Dayanımı

Beton bilindiği üzere gevrek bir malzemedir ve çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşüktür. Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükü etkisi altında, betonda oluşan maksimum gerilme ile eşdeğerdir. [1] Betonun basınç dayanımı pratikte en çok kullanılan dayanım değeridir. Bunun sebepleri arasında bu deneyin kolay oluşu, betonun basınç dayanımı ile çekme, eğilme vb. dayanımları arasında bir korelasyonun olması ve gerçek hayatta beton elemanlara etkiyen yüklerin çoğunluğunu basınç yüklerinin oluşturması olarak özetleyebiliriz.

Betonun basınç dayanımının bulunabilmesi için farklı yöntemler kullanılmakta olup, (hızlandırılmış kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı, karot numunelerinin basınç dayanımı, schmidt çekici kullanılması, ultrasonik ses cihazı ile basınç dayanımının bulunması gibi) en çok kullanılan yöntem standart basınç dayanımı deneyidir. Betonun standart basınç dayanımı, suda saklanmış, 28 günlük, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir numunelerin, eksenel basınç altında dayanımı olarak tanımlanır.[5] Aksi belirtilmediği sürece, betonun basınç dayanımından söz edildiğinde, söz konusu değerin, standart deney yöntemi ile elde edilen değer olduğu anlaşılmalıdır. Standart deney yöntemi ile ilgili Türk ve ASTM standartları şunlardır. TS EN 206, TS 3068, TS 3114, ASTM C 31, ASTM C 39'dur.

Standart deney yönteminde kullanılan numuneler silindir veya küp numune olarak 2 şekildedir. Silindir numuneler 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğindedir. Türkiye'de standart basınç deneyi için kullanılan küp numunelerinin kenar uzunluğu 15 cm'dir. Küp ve silindir numuneler arasında ilişki bulunduğu, silindir numune dayanımlarının, küp numune dayanımlarına oranı 0,8-0,85 olduğu bilinmektedir. Fakat bu oranın kimi zaman 0,7'ye kadar düştüğü veya 1,1'e kadar çıktığı da tespit edilmiştir [5]. Standartlarda her beton sınıfı için sağlanması gereken silindir ve küp dayanımları birlikte belirtilmiştir.

Beton karma işleminden sonra, taze beton, su emmeyen malzemeden yapılmış (çelik, plastik, dökme demir vb.) ve işlemden önce iç yüzeyleri yağlanmış kalıplara yerleştirilir.

Beton numuneler kalıp içerisinde 24 saat kaldıktan sonra kalıptan çıkarılır ve kür süresince (normalde 28 gün), 23 ± 1,7 ^{o}C sıcaklık ve %95 rölatif nem ortamına sahip bir kür odasında veya bu sıcaklıktaki su içerisinde bekletilmektedir. Kür süresi

tamamlanan numuneler deney aşamasına gelmiş olup, kırılma işlemine geçilir. Silindir numuneler için, kırma işleminden önce, numunenin alt ve üst yüzeyine gelen yükün üniform dağılması için çimento hamurundan veya kükürt-grafit tozu gibi bir malzemeden başlık yapılmalıdır.

Kür işleminin sonunda beton numuneler, beton presi kullanılarak kırılır. Basınç dayanımının numune cinsine, numune boyutlarına, kür koşullarına, kür süresine, yükleme hızına bağlı olduğu unutulmamalıdır.

1.4. Betonun Durabilite (Dayanıklılık) Özellikleri

Sertleşmiş betonda aranılan iki önemli özellik betonun dayanımı ve betonun durabilitesidir (dayanıklılık). Beton kullanılacağı yapının gerektirdiği yeterli dayanıma sahip olmasının yanında, bu yapı için aranılan servis ömrü süresince işlevini koruyabilmelidir. Beton durabilitesi; betonun kullanıldığı yapıya göre gereken hizmet ömrü boyunca özelliklerini koruyabilmesidir [2].

Beton servis ömrü süresince donma-çözüme, alkali agrega reaksiyonları vb. bir takım etkilere maruz kalmakta ve bu durum betonda bozulmalara yol açmaktadır. Bu bozulmalar sonucunda beton daha boşluklu bir hale gelmekte, beton içerisinde yer alan donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve beton içerisinde büyük gerilmeler oluşabilmektedir.

Betonun bozulmasına yol açan etkenleri şu şekilde sıralayabiliriz.

- Betonda bulunan kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve betondan uzaklaşması
- Sülfat Etkisi
- Deniz suyunun etkisi
- Asit etkisi
- Alkali Agrega Reaksiyonu
- Donma-Çözünme Etkisi
- Aşınma
- Beton Çeliğinin Korozyonu (Karbonatlaşma ve/veya klora bağlı olarak)

Yukarıda sıralanan unsurlardan donma-çözünme, aşınma ve korozyonu fiziksel etkiler, kalan diğer unsurları ise kimyasal etkiler olarak ayırabiliriz.

Tüm bu etkenler kimyasal veya fiziksel yollarla betonun çatlamasına yol açmakta ve bu durum betonun daha boşluklu bir hal almasına, beton içerisinde yer alan donatının daha fazla korozyona uğramasına sebep olmaktadır. Betonun boşluk hacminin artması ile betonun bozulma hızı da zamanla artmaktadır. Bu koşullar altında beton gereken servis ömründen önce işlevselliğini ve dayanımını kaybedebilmektedir.

1.4.1. Betonun Geçirimlilik Özellikleri

Beton durabilitesi açısından beton geçirimliliği ve betonun boşluk yapısı oldukça önemlidir. Çünkü betonu etkileyen dış etkenler beton içerisine, kılcal boşluklar vasıtası ile nüfuz etmektedir. Aynı zamanda betonda yer alan boşluklar betonun dayanımını da olumsuz etkilemektedir. Betonun geçirimliliği ne kadar az olursa, bahsedilen dış etkenler beton içerisine nüfuz edemeyeceği için, betonun bozulması engellenmiş olacak, dayanımı korunabilecektir.

Beton içerisinde farklı sebeplerle ve şekillerde meydana gelen bir takım boşluklar mevcuttur. Bu boşluklar betonun geçirimlilik ve su emme özellikleri ile doğrudan ilgilidirler. Bu boşlukları şu şekilde sıralayabiliriz.

Jel Boşlukları ve Kapiler Boşluklar : Betonun hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jellerinin yapısında çok küçük boyutlarda boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar jel yapısının %28'ini oluşturmaktadır [1]. Bu tür boşluklar içerisinde su ancak çok düşük sıcaklıklarda donabilmektedir. Bu sebeple bu boşluklar beton durabilitesinde ve geçirimliliğinde aktif bir rol almamaktadırlar.

Beton üretiminde kullanılan suyun bir kısmı, çimentonun hidratasyonu için bir kısmı ise istenilen işlenebilmeyi sağlamak için kullanılır. Çimento hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jellerinin aralarında yer alan su taneleri beton içerisinde yer alan kapiler boşlukları oluşturmaktırlar. Beton içerisinde yer alan bu kapiler boşluklar betonun dayanımını etkilediği gibi, beton içerisinde suyun ilerlemesi ile de yakından ilgilidir. Bu boşluklar beton içerisinde çok miktarlarda olduğu zaman beton içerisindeki su kolayca yol bulabilmektedir. Hidratasyon sırasında oluşan jellerin hacimlerinin artması ile bu boşluklar küçülmekte ve aralarındaki bağlantılar

azalmaktadır. Kapiler boşluklar içerisine giren su donma-çözünme etkileri, bu boşluklara sızan suyun içerisindeki sülfat, asit gibi yabancı maddelerin oluşturacağı kimyasal tepkimeler sonucunda, beton içerisinde genleşmelere ve çatlamalara yol açmaktadır.

Günümüz beton teknolojisinde çok ince yapıya sahip kimyasal katkı maddelerinin beton üretiminde kullanılması sonucunda, istenilen işlenebilirlik daha az su kullanılarak sağlayabilmektedir. Öte yandan puzolanik malzemelerin (yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül vb.) iki tür işlevi vardır. Çok ince tanelerden oluşmalarından ötürü boşlukları tıkama ve puzolanik özelliklerinden dolayı $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşturmasıdır. Bu durum beton içerisinde oluşabilecek boşlukların sayısını ve miktarının azaltmakta ve betonun dış etkilere karşı direncini ve betonun dayanımını arttırmaktadır.

Sürüklenmiş Hava Kabarcıkları: Beton üretiminde, betonun donma-çözünme etkileri karşısında dayanıklılığını arttırmak, yangın dayanımını arttırma, işlenebilmeyi kolaylaştırmak, terlemeyi azaltmak vb. sebeplerle, hava sürükleyici katkı maddelerinin kullanılmasıyla istenerek hava boşlukları oluşturulmaktadır. Bu boşluklar küresel şekilli olup, 0,05 mm – 1,25 mm boyutlarındadır.[1] Aralarında bağlantı yoktur. Bu tür boşluklar toplam beton hacminin %4'ü ile %8'i aralığında değişmektedir.

Hapsolmuş Hava Boşlukları: Betonun karılması ve yerleştirilmesi esnasında, beton içerisinde hapsolmuş boşluklardır. Bu tür boşlukların bir kısmı yerleştirme esnasında sıkıştırma işlemi yapılarak kaybolsa bile bir miktar boşluk kalabilmektedir. Bu tür boşluklar beton içerisinde gelişigüzel dağılım gösteren, değişik şekil ve boyutlardaki boşluklardır. Normal sıkıştırma işlemine maruz betonlar dahilinde bu tür boşlukların oranı %0,5-%3 aralığında değişmektedir.

Beton içerisinde bu boşlukların yanı sıra terleme ve çimento hamurunun büzülmesi sebebiyle oluşmuş boşluklarda bulunabilmektedir.

Beton içerisinde bulunan bu boşluklar betonun geçirimliliği ile doğrudan ilgilidir. Beton içerisinde bulunan boşlukların tamamı su ile dolu değilse, ıslak bir ortamda beton içerisine su girebilmektedir. Emilen bu su beton içerisindeki boşluk hacmi ile doğru orantılıdır. Su emme kapasiteleri yüksek olan betonların dayanımları da düşük olmaktadır. Bunun yanında betonun dayanıklılığı da su emme özelliğinden

etkilenebilmektedir. Çünkü bu boşluklardaki suyun donarak genleşmesi, betonun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksitin çözünerek yüzeye çıkması ve boşluk oluşturması, betona sızan suyun donatıda korozyon meydana getirmesi ve su içerisinde yer alan asit, sülfat, klor ve benzeri zararlı maddelerin oluşturduğu etkiler sonucu betonun dayanıklılığı azalmaktadır.

Betonun su emme özelliği ile geçirimlilik özelliği birbirinden ayrılabilir. Su emme beton içerisine sadece suyun girişi olmasına rağmen, geçirimlilik beton içerisinde akışkan tüm maddelerin (su, gaz, likit sıvılar vb.) girmesidir. Ama pratikte daha çok betonun su geçirimliliği dikkate alınmaktadır.

Beton geçirimliliği, depolar ve barajların yapımında kullanılan, kısaca suya maruz kalan tüm yapılardaki betonlar için önemli bir özelliktir.

1.4.2. Betonda Kılcal Su Emme Miktarının Belirlenmesi

Beton su ile temas eden yüzeylerinde, beton içerisinde bulunan kapiler boşluklarda, su kılcallık etkisi ile ilerleyebilmektedir. Betonun durabilitesini etkileyen bu olay "*kılcal su emme*" olarak tanımlanmaktadır. Betonun bu özelliğini belirmek için "*kılcal su emme"* deneyi yapılır. Bu deneyde prizma şekilli kalıplara dökülmüş beton numuneleri, kür süresini tamamladıktan sonra, belirli boyutlarda kesilip düzeltilerek 70 ^{o}C etüvde 24 saat kurutulur. Bu deney için her betondan 3 adet farklı numune alınır. Bu işlemden sonra numunenin su ile temas edecek yüzeyi dışında kalan tüm yüzeyleri, su geçişini engellemek için, parafin ile kaplanır. Bu işlemden sonra numunenin kuru ağırlığı belirlenir. Deneyin hazırlık aşamaları geçildikten sonra, deneye başlarken, numunelerin su ile temas edecek yüzeyleri alta gelecek şekilde, içi belirli yükseklikte su ile dolu kaba yerleştirilir ve belirli aralıklar ile numunenin ağırlığı ölçülür. Numune geçen her süre zarında daha fazla su emeceğinden dolayı, ağırlığı da aynı oranda artacaktır. Yapılan çalışmalarda beton numunesi tarafında emilen suyun hacmi ile geçen sürenin karekökünün doğru orantılı olduğu tespit edilmiş ve bu orana *"kılcallık katsayısı"* denmiştir.

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

Bu denklemde;

ΔQ : Numune Ağırlığındaki Değişim

A : Numunenin Suya Temas Eden Yüzeyinin Alanı (cm²)

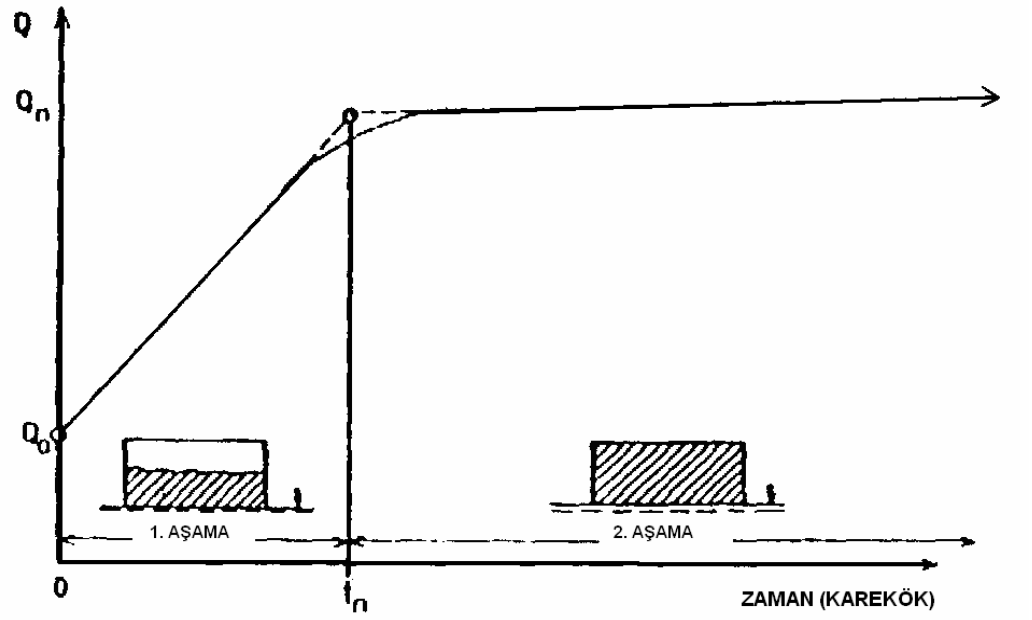
t_d : Son Okumaya Kadar Geçen Süre (dk)

k : Kılcallık Katsayısı

Uygulamada kalınlığı 0,08 – 0,10 m düzeyinde, ince yapı elemanlarında su geçirimlilik katsayısı 10^{-9} – 10^{-10} m/s'den az ise malzeme geçirimsiz sayılır.

Yapılan diğer çalışmalarda betonda kapilarite özelliklerinin 3 farklı katsayı ile tanımlanabileceği tespit edilmiştir. [6] Fagerlund yaptığı çalışmalarla Kılcallık Katsayısı, Penetrasyon Direnci Katsayısı ve Etkin Porozite Katsayısı olmak üzere 3 farklı katsayı elde etmiştir.

Fagerlund kılcal su emme deneyini 2 farklı aşamada ele almaktadır. 1. aşamada su kılcallık etkisi ile büyük ve kapiler boşlukları doldurmaktadır. 2. aşamada ise aktif olmayan, daha küçük boyutlu boşluklar daha yavaş bir şekilde dolmaktadır. (Şekil 1.2)



Şekil 1.2 : Kılcal Su Emme Deneyi Safhaları

Deney için hazırlanmış olan numunelerin belirli zaman aralıkları ile tartılarak ağırlıkları kaydedilir. Bu işlem sonucunda zamanın karekökü yatay eksene, emilen su miktarı ise düşey eksene yerleştirilerek Şekil 1.2 çizilir. Bu şekilde kapiler

boşlukların tamamının dolduğu kabul edilen birinci aşamanın sonuna kadar geçen tn süresi belirlenir. Bulunan tn süresi denklem 1.2 kullanılarak kılcallık katsayısı belirlenir.

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

Burada;

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)

Penetrasyon Direnci katsayısı ise beton içerisindeki ilerleyen suya karşı betonun gösterdiği direnç olarak tanımlanabilmektedir. Bu katsayı ise denklem 1.3'e göre tanımlanmaktadır.

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

Burada;

m : Penetrasyon direnci (sn/m^2)

t_n : Kapiler boşlukların dolması için geçen zaman (sn)

h : Numunenin yüksekliği (m)

Etkin porozite katsayısı ise beton içerisinde bulunan boşluk hacmi ile ilgilidir. Bu katsayı beton içerisinde yer alan boşluk hacminin, betonun su emmesi sonucu dolan hacmine oranı olarak adlandırılabilir.

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

ε_e : Etkin porozite

1000: Suyun özgül ağırlığını (kg/m³)

Q_n : Numunenin ilk ağırlığını (kg)

Q_0 : Numunenin son ağırlığını (kg)

A : Numunenin yüzey alanı (m^2)

h : Numunenin yüksekliğini (m) temsil etmektedir.

1.4.3. Hızlı Klorür Geçirimliliği Yöntemi

Betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli etmenlerden biri beton içerisine çeşitli yollardan giren klor iyonlarıdır. Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, denizden çıkarılan agregalar, buz eritici kimyasallar veya deniz suyu gibi kaynaklardan betona tesir edebilecek klor iyonları, korozyon esnasında donatı yüzeyinde oluşan ve koruyucu nitelikteki oksit tabakası ile reaksiyona girerek, demir klorür bileşiminde suda çözünebilen gayet boşluklu bir yapıya dönüşürler. [7] Bu sebeple beton içerisinde yer alan klor iyonu miktarının belirli bir eşik değeri aşmaması gerekmektedir (0,6 – 1,2 kg Cl^-/m^3) [1].

Betonun klor geçirimliliğinin yüksek olması beton içerisine klor iyonlarının daha kolay girebilmesini ve böylece beton içerisindeki donatıya daha kolay ulaşabilmesinin sağlar. Betonun dayanıklılığını koruyabilmesi ve betonarme donatının korozyona uğramasını önlemek için, klor geçirimliliği düşük betonlar üretilmektedir. Bunun için beton üretiminde bağlayıcı madde olarak bir miktar puzolanın (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) konulması olumlu sonuçlar verebilmektedir [8,9,10]. Aynı zamanda çimento içerisinde C_3A oranının artması sonucuyla, betonda klor iyonunu etkisi ile oluşan korozyon başlangıcı engellenmiş olur. Bunun sebebi C_3A'nın klor iyonlarını bağlayabilmesidir [8]. Beton içerisinde puzolan kullanımı sonucu C_3A miktarının arttığı ve bu sebeple klor iyonu bağlama kapasitesinin yükseldiği belirtilmektedir [9]. Hussain'e göre betonda C_3A oranının %2'den %14'e çıkması sonucu, klor iyonlarını bağlama kapasitesi ve donatı korozyonu başlama süresi 2,43 ve 2,45 kat daha artmaktadır [11].

Betonun klor iyonu geçirimliliğini belirlemek için ASTM 1202 standardında verilen metot yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu standarda anlatılan metot, betonun elektriksel iletkenliğinin incelenerek, betonun klor iyonu geçişine karşı göstereceği direncin tespit edilmesine dayanır [12]. Bu test metodunda 50 mm uzunluğunda, 10 mm çapında silindir numuneler hazırlanır. Bu numunelerin yüzeyleri elektrik iletmeyen epoksi malzemesi ile kaplanır. Yüzeydeki epoksi 24 saat süre kurumaya bırakıldıktan sonra numuneler vakum pompasının kabına yerleştirilerek ağzı hava almayacak şekilde kapatılır ve vakum pompası çalıştırılır. Pompa çalıştırıldıktan kısa bir süre sonra kabın içerisindeki basınç 1 mmHg'nin altına düşer. Numuneler bu basınç altında 3 saat süre ile tutulur. 3 saatin sonunda kap tamamen saf su ile doldurularak numuneler su içerisinde 1 saat daha vakumda tutulur. Vakumlama işleminden sonra numuneler 18±2 saat süre ile saf su içerisinde bekletilir. Bu işlemden sonra numuneler Şekil 1.3'de yer alan hücrelerin arasına yerleştirilir ve sızıntıya engellemek için numuneyle hücreler arasına hızlı kuruma özelliğine sahip silikon malzeme sürülür. Deneye hazır hale gelen düzenekte (Şekil 1.3) hücrelerden bir tanesine %3'lük NaCl çözeltisi, diğerine ise 0,3 N NaOH çözeltisi doldurulur. Bu iki hücre arasında 60 V'luk potansiyel fark oluşturmak için, güç kaynağının (–) kutbu NaCl hücresine, (+) kutbu ise NaOH hücresine bağlanır ve güç kaynağı çalıştırılır. Bu deney toplam 6 saat sürmektedir. Deneyin başlangıcında, bitimine kadar, her 30 dakikada bir ampermetre yardımı ile devreden geçen akım ölçülür ve kaydedilir.

Kaydedilen akım değerleri standartta yer alan aşağıdaki formüle (Denklem 1.5) yerleştirilerek devreden geçen toplam yük hesaplanır.

$$Q = 900 (I_0 + I_{30} + \ldots\ldots + I_{360}) \qquad \textbf{(1.5)}$$

Burada;

Q: Yük (coulomb)

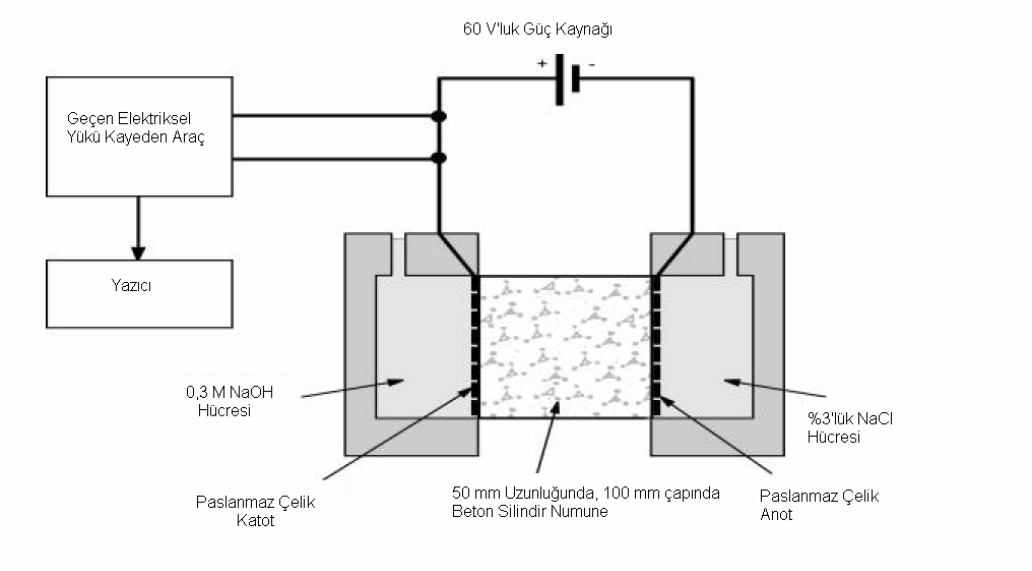
I_0: Düzeneğe akım uygulandığı anda ölçülen akım (amper)

$I_{t:}$ Düzeneğe akım uygulanmasından t dakika sonra ölçülen akım (amper)

Bulunan toplam yük değerleri ile Tablo 1.4'de yer alan değerler karşılaştırılarak betonun klor geçirimliliği değerlendirilir.

Tablo 1.4: Toplam Yük ile Klorür Geçirimliliği Arasındaki İlişki [12]

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



Şekil 1.3: Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Düzeneği

1.5. Beton Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar (Puzolanlar)

Beton içerisinde kullanılan katkı maddelerinin bir diğer ana grubu ise mineral katkılardır. Mineral katkılar puzolanlar olarak da anılmaktadır. Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan, ancak ince taneli duruma geldiklerinde ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadırlar. Elde edildikleri kaynaklara göre mineral katkı maddelerini (puzolanları) üç grupta toplayabilmek mümkündür.

1- Doğal malzemeler (volkanik küller, traslar, diatomlu topraklar ve taşunu)

2- Beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan ve endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen malzemeler (uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu)

3- Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyl)[1]

Beton içerisinde kullanılan mineral katkılar ancak istenilen inceliğe getirildikten sonra etkili olabilmektedirler. Mineral katkılar betona diğer ana malzemeler ile (çimento, agrega, su) birlikte katılır ve birlikte karıştırılır. Mineral katkıların beton özelliklerine olan etkilerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

1- Taze betonun işlenebilmesini arttırmak (ancak küresel taneliler bu özelliği gösterebilir)

2- Betonun belirli bir özelliğini (veya belirli birkaç özelliğini) geliştirmek,

   Örneğin;

   - Terlemeyi ve segregasyonu azaltmak,
   - Hidratasyon ısısını azaltmak,
   - Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşacak genleşmeyi azaltmak,
   - Su geçirgenliği azaltmak,
   - Nihai dayanımı arttırmak,
   - Sülfatlara karşı dayanıklılığını arttırmak.

3- Daha ekonomik beton elde etmek.[1]

Büyük oranda silis ve alüminden oluşan puzolanların, söndürülmüş kireç ve su ile karıştırılmasından sonra, kalsiyum hidroksit, su ve silis arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucunda, portland çimentosunda olduğu gibi, bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri oluşmaktadır.

Puzolanik malzemelerin su ve kireçle ne ölçüde reaksiyona gireceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği "puzolanik aktivite" olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik aktivite ASTM standartlarına göre hesaplanabilmektedir. Bu standarda göre 500 gr portland çimentosu + 1375 gr kum + 242 ml su kullanılarak kontrol harcı hazırlanmaktadır. Daha sonra 400 gr portland çimentosu + 100 gr puzolan + 1375 gr

kum + kontrol karışımının gösterdiği akmayı sağlayacak kadar su kullanılarak puzolanlı harç elde edilir (Puzolanlı harcın miktarları puzolan çeşidine göre değişmektedir). Bu iki harçtan 5 cm'lik küp numuneler hazırlanarak 7 ve 28 günlük basınç deneyine tabi tutulmaktadır (TS EN 450 standardına göre kütlece %75 referans çimentosu + % 25 puzolan içeren harç numunesi ile standart harç numunesi üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmaktadır). Puzolanik aktivite "dayanım aktivite indeksi" ile ifade edilmektedir.

Dayanım Aktivite İndeksi = $(D_p/D_k) \times 100$ **(1.6)**

D_p: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

D_k: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

Dayanım aktivite indeksi ASTM standartlarına göre en az 75, Türk Standartlarına göre ise en az 70 olmalıdır.

1.5.1. Silis Dumanı

Silisyum metalinin veya silisyumlu metal alaşımlarının üretimi esnasında, yüksek saflıkta kuvars, 2000 ^oC sıcaklıktaki elektrik fırınlarında kömür yardımı ile indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Bu esnada ortaya çıkan ve büyük miktarda SiO'dan oluşan gaz, ani bir şekilde soğutularak, amorf yapıya sahip SiO_2'ye dönüşmektedir. Bu malzeme ince katı bir hal alır ve "silis dumanı" olarak adlandırılmaktadır. Oluşan bu malzeme, yüksek miktarda amorf SiO_2 içermesinden ve ince daneli bir malzeme olmasından dolayı puzolanik malzeme olarak kullanılabilmektedir.

Silis dumanı, portland çimentosu klinkeri, küçük miktarda alçı taşı ile öğütülerek silis dumanlı çimento olarak kullanılmasının yanında, daha yaygın beton katı malzemesi olarak kullanılabilmektedir.

Beton içerisinde genellikle %10 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılan silis dumanı ince daneli olması ve yüksek oranda SiO_2 içermesi sebebiyle erken yaşlarda ve nihai dayanımlarda oldukça yüksek beton dayanımı sağlar. Bunun yanında, taze betonda terlemeyi ve segregasyonu, betonun hidratasyon ısısını, sertleşmiş betonun su geçirimliliğini, sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonlarını azaltmakta, sertleşmiş betonun sülfata karşı dayanımını arttırmaktadır. Bunun yanında silis dumanı kullanılan betonlarda karışım suyu

ihtiyacı arttığından, telafi edilebilmesi için su azaltıcı katkılar kullanılması gerektirmektedir. Bu malzeme betonda daha çok miktarda plastik büzülme çatlağına yol açabilmektedir.

1.5.2. Uçucu Kül

Termik santrallerde elektrik üretimi için kullanılan pulvarize kömürün yanması ile ortaya çıkan çok ince daneli yapıya sahip küllerin, termik santrallerin bacalarından bir takım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulması ve depolanması sonucu, beton içerisinde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilen uçucu kül elde edilmiş olur.

Bu malzeme yüksek miktarda SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitlerden oluşur. Bunun yanında içerisinde CaO, MgO, C ve Na_2O'da bulunabilmektedir. Uçucu küller küresek şekilli malzemelerdir. Danelerinin boyutları 1 – 150 μm arasında değişiklik göstermektedir. Yoğunlukları genellikle 2,1 – 2,7 (ortalama 2,4) g/cm³'dür.

Uçucu küller silisli ve alüminli amorf yapıya sahip olduklarından doğal puzolanlar gibi $Ca(OH)_2$ ile sulu ortamlarda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği göstermektedir. Bu nedenle hem uçucu küllü portland çimento üretiminde hem de doğrudan beton katkı malzemesi olarak kullanılabilmektedir.

Uçucu kül; taze beton içerisindeki işlenebilmeyi, sertleşmiş betonda sülfatlara karşı dayanıklılığı arttırabilmektedir. Taze betonda terlemeyi, hidratasyon ısısını, sertleşmiş betonun su geçirimliliğini azaltmaktadır. Bunun yanında uçucu küllerin betonun priz almasını geciktirmesinden dolayı soğuk havalarda sorun yaratabilmektedir. Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmaktadır. Uçucu kül kullanılması durumunda betonun daha uzun süre kür edilmesi gerekmektedir.

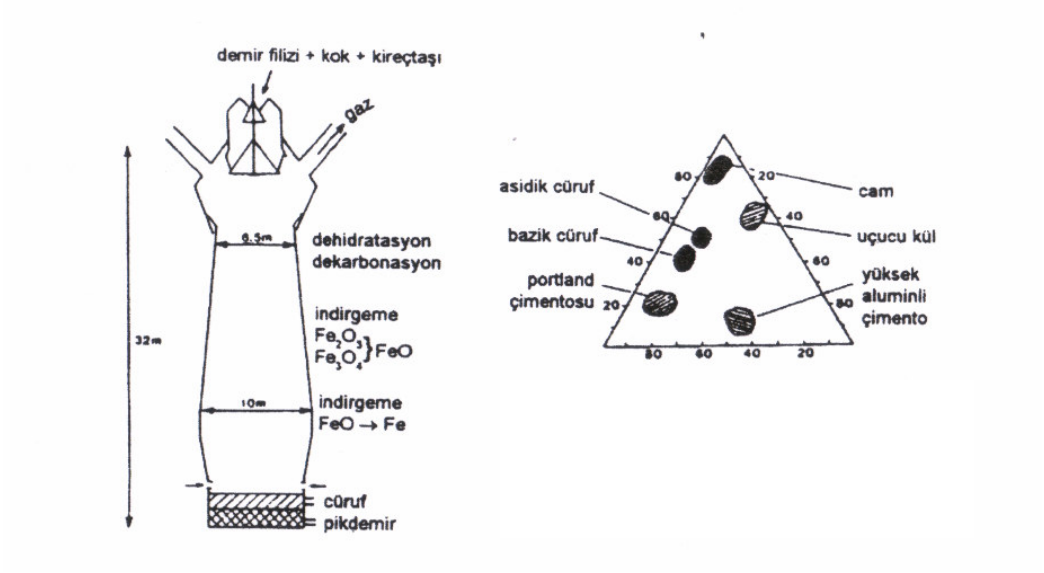
1.5.3. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

1.5.3.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi

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 sonucu, 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 ^{o}C'deki ÖGYFC ($CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$), 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 hidratasyonuyla ortaya çıkan $Ca(OH)_2$'yi kullanmak suret ile bağlayıcı özelliğe sahip olur [13].

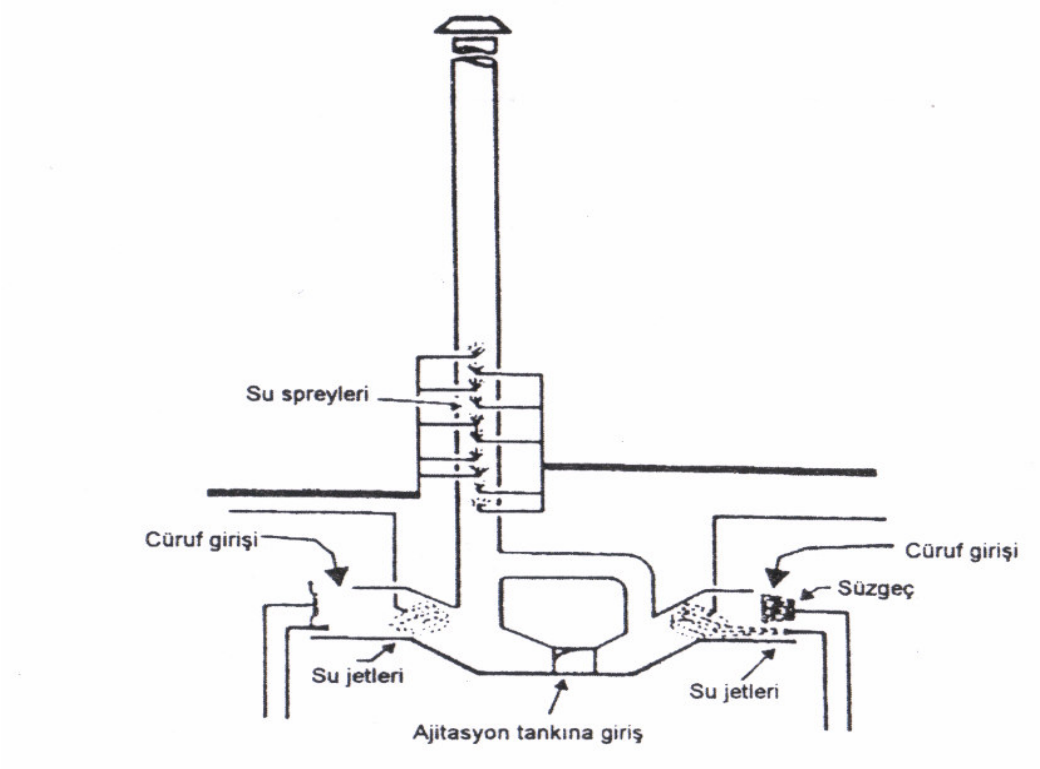
1862 yılında Langens'in ÖGYFC'lerin bağlayıcı özelliklere sahip olduğu gözleminin ardından, 1865 yılında ilk kez ÖGYFC-kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. ÖGYFC'nin çimento hammaddesi olarak kullanımı ise ilk kez 1883 yılındadır. Portland çimentosu klinkeri ÖGYFC ile birlikte öğütülerek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi de 1892 yılında Almanya'da başlamıştır. [13] ÖGYFC'nin beton katkı maddesi olarak kullanılması Güney Afrika'da Stutterheim tarafından 1947-1953 yılları arasında yapılan araştırmalardan sonra başlamıştır [1].



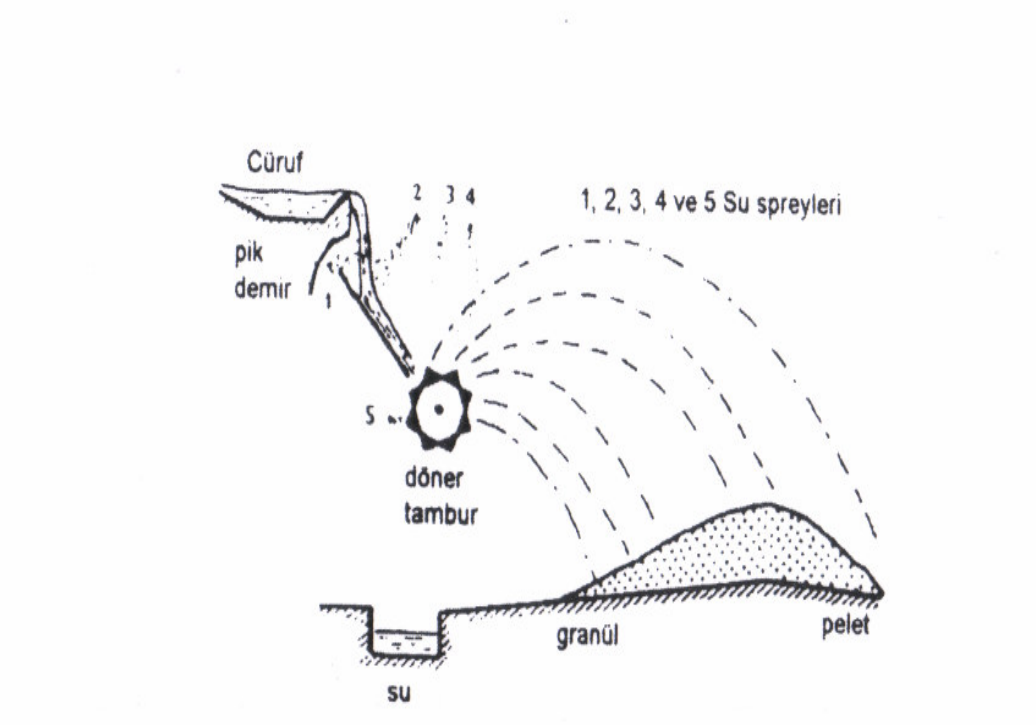
Şekil 1.4: Ham Demir Üretim Safhaları

YFC'nin ani soğutulması için iki yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi Granülasyon Yöntemi (Şekil 1.5), ikincisi ise Peletleme Yöntemi (Şekil 1.6)'dır. Granülasyon yönteminde çok miktarda (100 m^3/ton cüruf) su kullanılması zorunluluğu vardır. Bu işlem sonucunda cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık %30 civarındadır. Bu su ya kurutucu değirmenler ya da filtreli havuzlarda cüruftan

uzaklaştırılır. Elde edilen yöntem ÖGYFC'nin özellikleri bakımından en iyi yöntem olmakla birlikte, pahalı bir yöntemdir. Öte yandan Kanada'da geliştirilmiş, Peletleme yöntemi daha yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntemde erimiş haldeki cüruf önce suyla soğutulur, daha sonra dönen (dakikada 300 tur) bir tambur vasıtasıyla havaya fırlatılır. Bu yöntemde kullanılan su miktarı 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m³'dür. İşlem sonucunda cüruf içinde kalan su miktarı ise %10'dur [13].



Şekil 1.5: Granülasyon Yöntemi



Şekil 1.6: Peletleme Yöntemi

1.5.3.2. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu

Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu içerisinde, CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, MnO gibi oksitler yer almaktadır. Farklı ülkeler için Yüksek Fırın Cürufu kompozisyonları Tablo 1.5'de verilmiştir.

Tablo 1.5: Yüksek Fırın Cüruflarının Komposizyonları %[1]

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO_2	30-40	30-36	33-37	34-36
Al_2O_3	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe_2O_3	0,1-1,5	-	0-0,7	0,3-2,5
MgO	0-19	8-21	1-3	3,5-7
MnO	0,2-1,5	-	0,3-1,5	1-2,5
S	0-2	1-1,6	0,6-0,8	1-2

ÖGYFC içerisinde yer alan CaO, bu malzemenin kendiliğinden bir miktar bağlayıcılık özelliği göstermesini sağlar. Bunun yanında cürufun alkalinitesi ne kadar yüksekse, hidrolik özelliğinin de o kadar iyi olduğu kabul edilir [13]. Cüruf içerisinde, belirli bir sınır değer kadar CaO/SiO_2 oranının artması ile ÖGYFC'nin hidrolik özelliği artar. Ancak bu sınır değer arttığında hidrolik özellikte azalma görülür. Bunun sebebi CaO miktarının çok yüksek olması durumunda granülasyonun güçleşmesidir. Sabit bir CaO/SiO_2 oranı için Al_2O_3 miktarının artması cürufun aktivitesini arttırır. Cüruf içerisinde yer alan mangan ve demir oksitler dayanımı olumsuz yönde etkiler. (%10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi yoktur.) Yüksek miktarlarda MgO içeren ÖGYFC'lerin hidrolik özelliklerinde bir miktar olumsuzluk gözlenirken, MgO, portland çimentosunda olduğu gibi cüruf içerisinde hacim artışlarına sebep olmaz.

Cürufun aktivite indeksini belirlemek için ASTM C 989 sayılı standarda göre hazırlanan harç numunelerinin, 7 ve 28 günlük basınç deneyi sonuçları değerlendirilmektedir. Bu standarda göre 500 gr portland çimentosu + 1375 gr standart kum ile kontrol harcı hazırlanır. Daha sonra 250 gr portland çimentosu + 250 gr cüruf + 1375 gr standart kumdan oluşan cüruflu harç hazırlanır. Bu iki harçtan hazırlanan 5 cm'lik küp numuneler 7 ve 28 günlük basınç deneyine tabi tutulur. Elde edilen sonuçlardan aşağıdaki formüle göre cürufun aktivite indeksi bulunur.

$$\text{Aktivite İndeksi} = \frac{\text{Cüruflu Harç Numunelerinin Ortalama Basınç Dayanımı}}{\text{Referans Numunelerinin Ortalama Basınç Dayanımı}} \times 100 \qquad \textbf{(1.7)}$$

ASTM C 989 standardı beton kullanılabilecek öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu sınıf 80, sınıf 100 ve sınıf 120 olarak 3 gruba ayırmaktadır. Aşağıdaki tablolarda ASTM standartlarına göre granüle yüksek fırın cürufunun taşıması gereken kimyasal ve fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1.6: ASTM standartlarına göre Katkı Maddesi olarak kullanılacak Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri [1]

Kükürt (S) maks. %	2,5
SO3 olarak belirtilen sülfat iyonu maks. %	4,5

Tablo 1.7: ASTM standartlarına göre Katkı Maddesi olarak kullanılacak Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri [1] (Cüruf Aktivite İndeksi olarak belirtilen değerler 5 numunenin ortalamasıdır)

İncelik (45 µm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktar) maks. %	20
Cüruf Aktivite İndeksi min. %	
7 Günlük	
Sınıf 80	-
Sınıf 100	78
Sınıf 120	95
28 Günlük	
Sınıf 80	75
Sınıf 100	95
Sınıf 120	110

1.5.3.3. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton İçerisinde Kullanılması

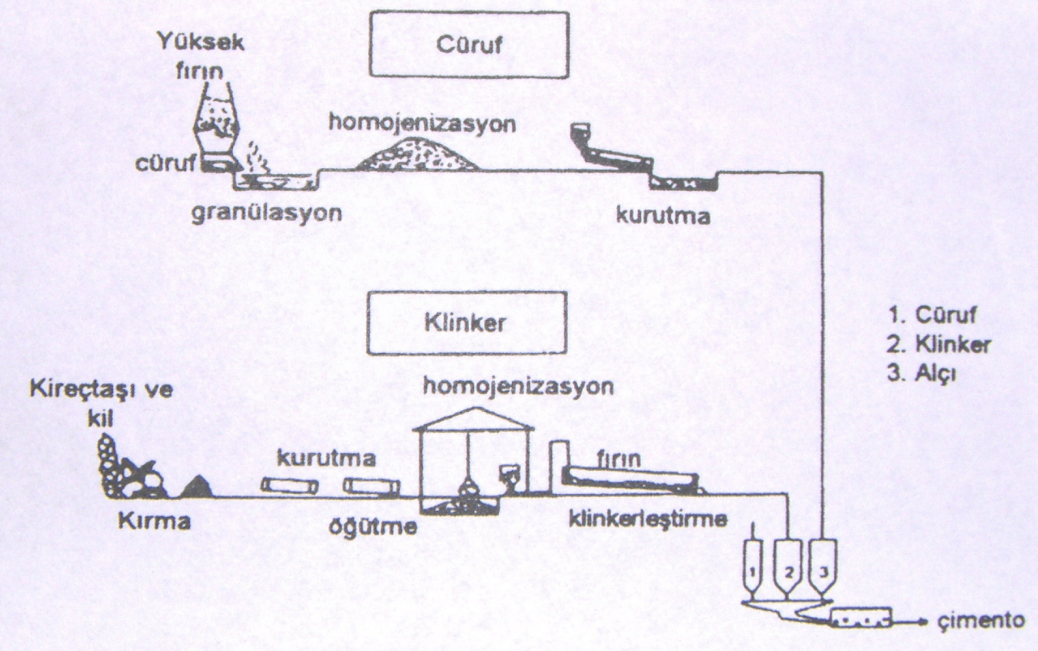
ÖGYFC uygulamada 3 farklı şekilde kullanılmaktadır:

1- Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirilerek, hidrolik bağlayıcı madde olarak doğrudan kullanılabilmekte,

2- Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülerek, "cüruflu çimento" üretiminde kullanılabilmekte,

3- Beton katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir.

ÖGYFC'nin, portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşı ile birleştirilerek birlikte veya ayrı ayrı öğütülmesi sonucunda meydana gelen cüruflu çimentoların üretim şeması Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7: Cüruflu Çimento Üretiminin basit şematik gösterimi

Cüruflu çimento üretiminde kullanılan cüruf miktarları ülkelere göre farklılıklar gösterebilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ASTM C 595'de belirtilen Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentolarında cüruf oranı %25-65, Almanya'da DIN 1164'de Eisenportland Çimentosunda en fazla %40, Hochofen Çimentosu'nda ise %41-85'dir. Fransa'da ise farklı 4 tür cüruflu çimento mevcut olup, %25-35, %45-55, %65-75 ve %80'in üzerinde cüruf katılabilmektedir. Ülkemizde ise TS EN 197-1'de belirtilen CEM II/A-S tipi çimentoda % 6-20, CEM II/B-S tipi çimentoda %21-35, CEM III/A tipi çimentoda % 36-65, CEM III/B tipi çimentoda % 66-80, CEM III/C tipi çimentoda % 81-95, CEM V/A tipi çimentoda % 18-30 ve CEM V/B tipi çimentoda % 31-50 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır.

ÖGYFC'nin ayrı bir şekilde öğütülerek beton katkı maddesi olarak kullanılmasının bazı avantajları bulunmaktadır. Bunları şu şekilde özetleyebiliriz.

- Ayrı öğütme, tanelerin istenilen inceliğe gelebilmesinde büyük randıman sağlanmaktadır. Bunun sebebi ÖGYFC'nin portland çimentosuna göre daha sert olmasıdır. Birlikte öğütüldüğünde klinker daha ince daneli, çimento ise daha kalın daneli olmaktadır.

- Cüruflu çimento depolanma esnasında nem aldığı takdirde veya uzun süre tutulduğu zaman prehidratasyon ve karbonatlaşma göstermekte, bağlayıcılık özelliği azalmaktadır. Cürufun depolanmasında bu tip sorunlar yoktur [1].

- ÖGYFC'nin beton katkı maddesi olarak kullanılması, betonun işlenebilmesini ve dayanımını arttırmakta, büzülmesini azaltmaktadır.

- ÖGYFC, değişik koşullarda kullanılacak beton karışımlarının hazırlanmasında esneklik getirmektedir.

1.5.3.4. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu

Beton içerisinde Portland çimentosu ile birlikte kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu, Portland çimentosu ve su arasında karıştırılma işleminden sonra kimyasal reaksiyonlarına başlar. ÖGYFC ile su arasında meydana gelen reaksiyonlar, cürufun bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Cürufun su içerisinde kısmi olarak erimesiyle, C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidrate silika alüminatlar çökelir. Bu süreç cürufun çimento ile reaksiyonlarına göre oldukça yavaştır ve reaksiyonlar sonucu güçlü bir bağlayıcılık özelliği oluşmaz. Bu süreci hızlandırmak için araştırmalar neticesinde alkalin aktivatörler (soda, kireç, sodyum, karbonat, sodyum silikat vb.) veya sülfat aktivatörler (alçı, anhidrit, fosfojips vb.) olmak üzere 2 ana gruba ayırabileceğimiz aktivatörlerin kullanılabileceği tespit edilmiştir.

ÖGYFC'nin portland çimentosu ile hidratasyonunu 2 aşamalı değerlendirmek mümkündür. 1. aşamada cürufla çimento içerisinde bulunan alkali hidroksit arasındaki reaksiyonlar, 2. aşama ise çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile cüruf arasında meydana gelen reaksiyonlardır.[1] Asıl güçlü reaksiyonlar, Portland Çimentosunun hidratasyonu sırasında meydana gelen $Ca(OH)_2$ (Kalsiyum Hidroksit) ile ÖGYFC arasında olmaktadır. Bu iki madde arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu C-S-H jelleri gibi çok yüksek oranda hidrolik bağlayıcı özelliği olan ürünler oluşmaktadır. Cüruflu çimentoların hidratasyonu esnasında oluşan C-S-H jellerinin yüzeylerinin Al_2O_3 ve MgO bakımından daha zengin olduğu tespit edilmiştir. Ortamın sıcaklığı ile birlikte reaksiyonlarda hızlanmaktadır.

1.5.3.5. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkisi

Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunu betona olan olumlu etkilerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Taze betonda işlenebilmeyi arttırmakta
- Taze betonun priz süresini uzatmakta
- Betonun hidratasyon ısısını azaltmakta
- Sertleşmiş betonun su geçirimliliğini azaltmakta
- Betondaki terlemeyi azaltmakta
- Sertleşmiş betonun sülfat dayanımını arttırmaktadır.

Bu etkilerinin yanında betona olumsuz yönde de etki edebilmektedir.

- Betonun soğuk havalarda priz alma süresini uzatmaktadır.
- Betonda belirli miktarlarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için, daha fazla hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Erken yaşlardaki beton dayanımı artışını azaltmaktadır.

2. BETONARME DONATI KOROZYONU

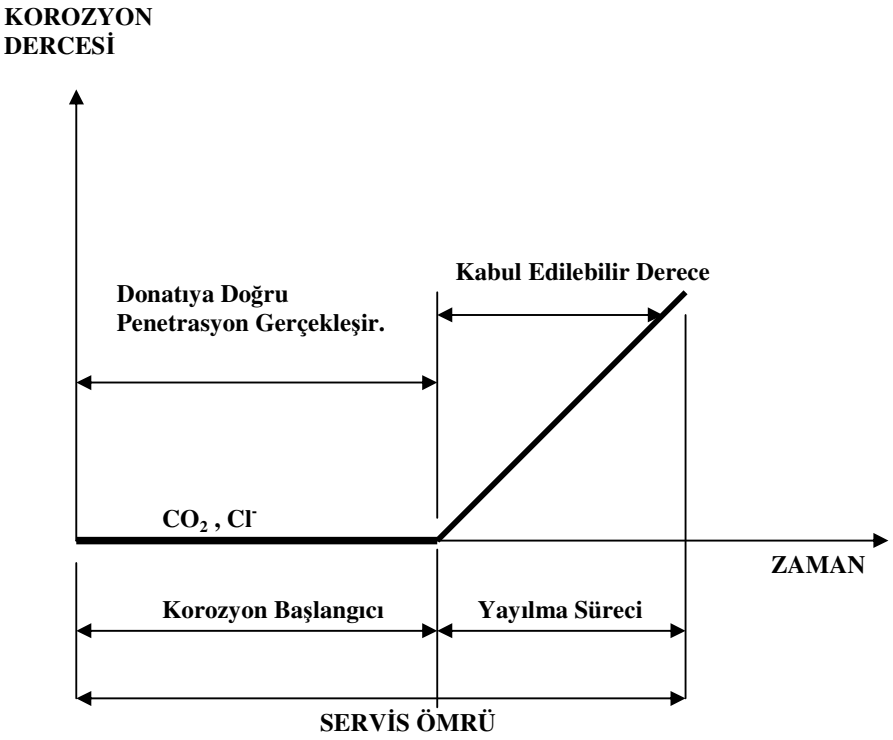
Beton elemanların çekme gerilmeleri karşısında düşük dayanımlar gösterdiği bilinmektedir. Betonun bu dezavantajını ortadan kaldırmak için çekme gerilmelerine maruz kalacak bölgelerde çelik çubuklar kullanılmak sureti ile betonarme elemanlar geliştirilmiştir. Betonarme elemanlarda kullanılan çelik çubuklar, betonarme elemanların durabilitesi yönünden önem taşımaktadır. Çünkü çelik çubuklarda meydana korozyon süreci ile birlikte, betonda meydana gelen genleşmeler sonucunda, beton tabakası çatlayabilmekte ve parçalanabilmektedir.

Uzun süreden beri yapılarda kullanılan betonarme elemanların içerisindeki donatılarda meydana gelen korozyon olayı, son günlerde durabilite problemleri açısından en önemli konu halini almıştır. Örnek olarak Avrupa'da altyapı tesisleri için harcanan ana giderler azalırken, bu tesislerin bakımları için harcanan giderler, büyük bir artış göstererek, yılda beş milyar dolarlara kadar yükselmiştir. Bu ülkelerde altyapı tesislerine bakım için harcanan giderler, toplam giderlerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Başka bir örnekte ise Amerika'da betonarme köprülerde ve otoparklarda, yalnızca çözücü tuzlardan dolayı meydana gelen hasarların onarılması için yapılan harcamalar yılda 325 milyon dolardan, 1000 milyon dolara kadar yükselmiştir [14].

Atmosfer koşulları altında bulunan çelik için korozyon kaçınılmazdır. Doğadaki bütün malzemeler de olduğu gibi çelik de daha az enerjili (daha kararlı) bir yapıya geçme eğilimdedir. Çeliğin hammaddesi olan demir elementi (Fe), kararsız bir yapıdadır ve daha kararlı bir yapı olan demir oksit (Fe_2O_3) haline geçme eğilimdedir [7]. Donatı betona gömüldükten sonra, yüzeyinde demir ve oksijen elementlerinden oluşan ve "Pas Tabakası" olarak adlandırılan, çok ince bir oksit tabakası meydana gelir. Normal şartlarda bu tabakanın oluşma süreci yavaştır. Fakat ortamda su bulunması halinde bu süreç hızlanır. Pas tabakasının oluşması ile donatı demir iyonu kaybedeceğinden, donatı kesitlerinde küçülmeler meydana gelir. Donatı yüzeyinde oluşan pas tabakası ilk etapta donatıyı dış etkilerden koruyan ve daha fazla pas oluşmasını engelleyen bir yapıdır [1,7,15]. Fakat bazı dışsal etkiler sonucu, (karbonatlaşma, klor iyonları vb.) ilk etapta oluşan ve pasif tabaka olarak adlandırılan pas tabakası aşınarak, donatının tekrar paslanmasına neden olur. Bu mekanizmanın tamamını betonarme donatılarda korozyon süreci olarak

tanımlayabiliriz. Bu süreç içerisinde oluşan Pas tabakası, donatı hacminden 2,5 – 3 kat daha fazla hacme sahiptir. Bu durum betonda istenmeyen gerilmeler oluşmasına, betonun çatlayabilmesine ve parçalanabilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca betonarme donatılarda, pas tabakasının tekrar tekrar oluşması sonucunda, donatı kesiti azalmakta ve böylece donatıların yük taşıma kapasiteleri olumsuz şekilde etkilenmektedir.

Korozyonun başlangıcından, betonarme elemanlarda onarım gerektirecek hasarlar oluşmasına kadar geçen süreç için farklı modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden birinde Tuutti (Şekil 2.1) beton içerisindeki korozyon oluşumunu "başlangıç" ve "ilerleme" olmak üzere 2 aşamaya ayırmaktadır [16]. "Başlangıç periyodu", korozyonu tetikleyecek dışsal etkilerin (klor iyonları, karbonatlaşma vb.) donatı yüzeyine ulaşması için geçen süre, "ilerleme periyodu" ise zamanla korozyon derinliğinin arttığı ve bozulmalara sebep olduğu süre olarak anlatılmaktadır. İlerleme periyodu esnasında korozyon hızını gösteren eğim, oksijen konsantrasyonu, bağıl nem ve sıcaklığa göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.1: Tuutti'ye göre Korozyon Süreci

2.1. Korozyon Mekanizması

2.1.1. Elektrolitik Hücre

Korozyon süreci boyunca, kimyasal reaksiyonlar ve elektriksel akımlar var olmasından dolayı, korozyon sürecini elektrokimyasal bir süreç olarak nitelendirebiliriz.

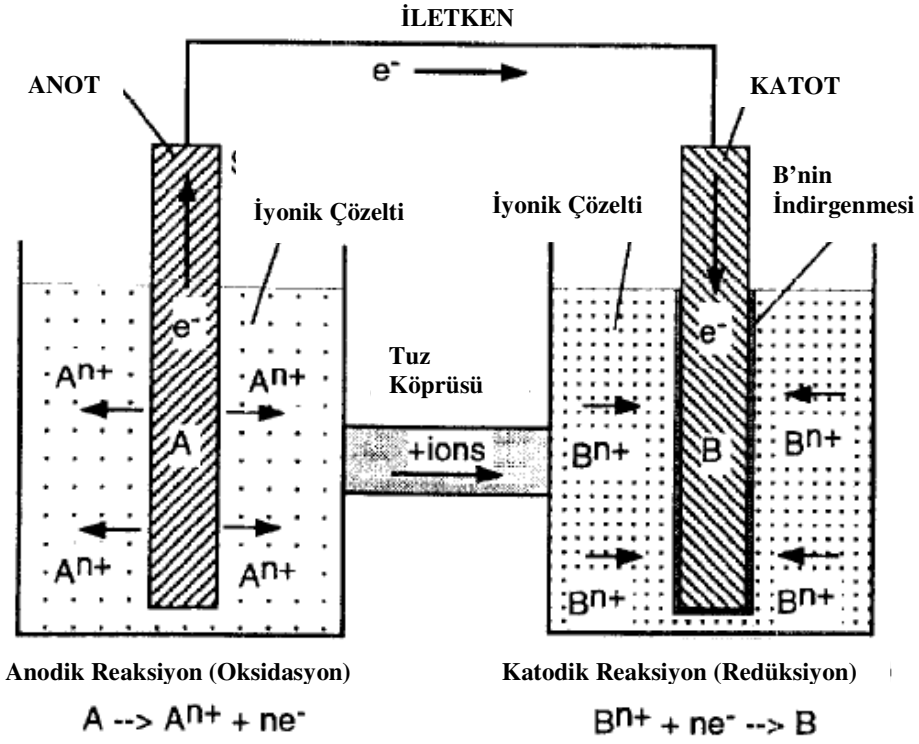
Korozyon süreci genel olarak elektrolitik hücre sistemi ile anlatılabilir. Şekil 2.2'de gösterilen elektrolitik hücre basit olarak, 2 elektrotu olan ve elektronların alınıp tüketilmesine dayalı iki farklı reaksiyonun gerçekleştiği bir sistem olarak tanımlanabilir. Metal elektrotlardan biri, bu metalin pozitif iyonlarını içeren iyonik bir çözeltiye batırılmış haldedir. Farklı bir metalden oluşan diğer elektrotta aynı şekilde pozitif iyonlarını içeren bir çözeltiye batırılmış haldedir. İki elektrotta dıştan bir iletkenle birbirlerine bağlanmış haldedir. Ayrıca çözeltiler arasında iyonların akışını sağlamak amacı ile tuz köprüsü oluşturulmuştur. Elektrotlardan biri yarı hücre reaksiyonlarının meydana geldiği "anot" olarak adlandırılır. Anot içerisinde bulunduğu çözeltiye elektron vererek çözülmeye başlar ve anot + yükle yüklenmiş olur.

$$A \rightarrow A^{+n} + ne \qquad \textbf{(2.1)}$$

Diğer elektrot "katot" olarak adlandırılır ve yarı hücre indirgeme reaksiyonları bu elektrotun yüzeyinde gerçekleşir. Katot elektronu toplar ve – yükle yüklenir.

$$B^{+n} + ne \rightarrow B \qquad \textbf{(2.2)}$$

Anot çözülme ile çözeltiye elektron verir. Bu elektronlar iletken bağlantı sayesinde katoda geçer. Katot da + yüklü iyonlarla birleşir ve katodun yüzeyinde bir tabaka oluşur. Elektriksel iletkenliğin sürdürülmesi için bu iki hücre arasında bir tuz köprüsü oluşturulur. Böylelikle anodik hücreden, katodik hücreye doğru pozitif iyon akışı sağlanır. Sonuç olarak: anot tükenir ve reaksiyon ürünleri katotta biriktirilir.



Şekil 2.2: Basit Elektrolitik Hücre

Genellikle oksidasyon reaksiyonları için ifade edilen, yarı-hücre potansiyeli, hangi atomların çözeltilerine ne kadar elektron bırakacaklarını ve pozitif yükle yükleneceklerini ifade eder. Yarı hücre potansiyeli standart indirgeme reaksiyonlarına göre tespit edilir. Standart yarı-hücre potansiyelinin daha küçük (negatif) değerler alması, metalin daha fazla elektron kaybetme eğilimde (korozyon eğilimi) olduğunu gösterir.

2.1.2. Polarizasyon

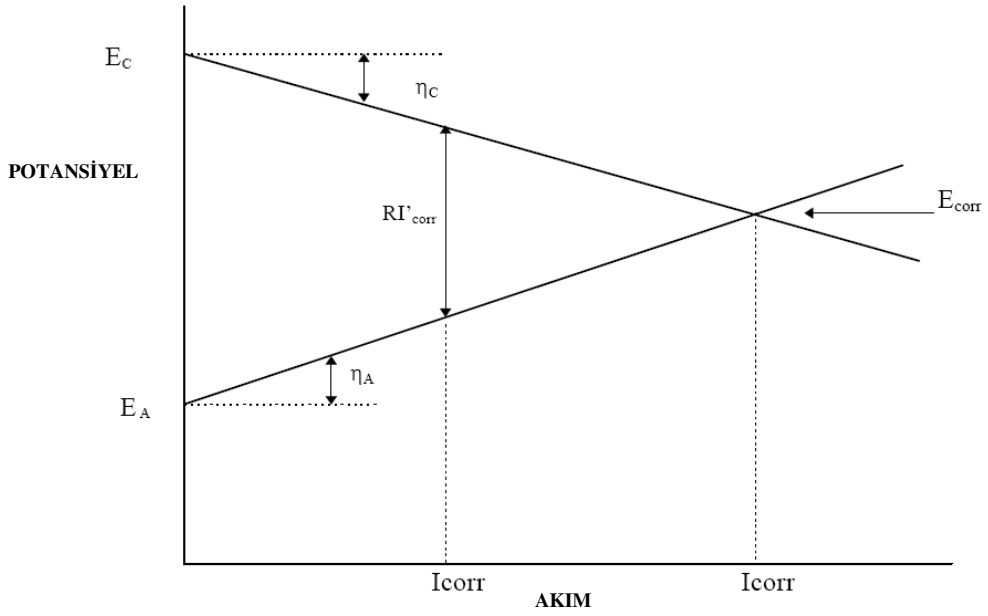
Bir elektrottan akım geçtiği durumdaki potansiyel ile akım geçmediği durumdaki potansiyel arasındaki fark elektrokimyasal polarizasyon olarak adlandırılır [17]. Polarizasyon aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$\eta_a = Ekor - Ea \quad \textbf{(2.3)}$$

$$\eta_c = Ec - Ekor \quad \textbf{(2.4)}$$

Burada; η_a ve η_c anodun veya katodun denge konumuna ulaştığı anda ne kadar polarize olduğunu göstermektedir. Ea ve Ec ise anot ve katodun yarı-hücre potansiyellerini ifade eder.

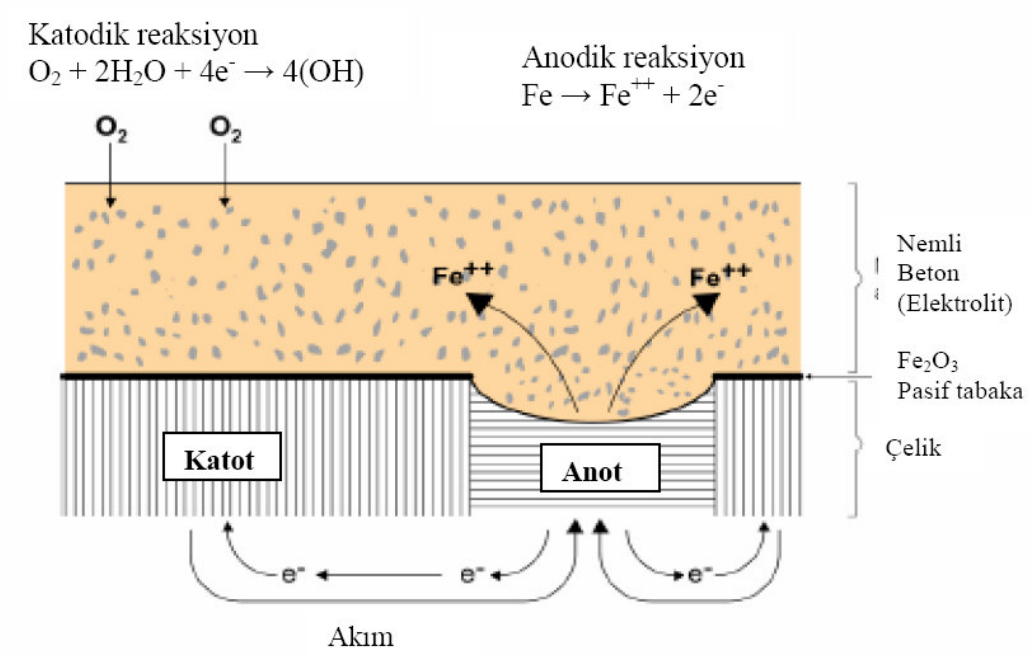
Akım ile Potansiyel arasındaki ilişkiyi, Evans basit bir grafik ile göstermiştir. Şekil 2.3'de Evans'ın diyagramının basitleştirilmiş bir hali görülmektedir. Apsis devredeki toplam akımı ifade etmektedir. Şekilde görülen 2 eğri ise anot ve katodun polarizasyon eğrileridir. Bu eğrilerin kesiştiği noktada anodik ve katodik akımlar birbirlerine eşittir ve harici bir yük akışı yoktur. İşte bu noktadaki Ekor korozyon potansiyeli, Ikor ise korozyon akımını ifade etmektedir.



Şekil 2.3: Evans Diyagramının Basitleştirilmiş Şekli (Anot ve Katodun Polarizasyonu)

2.2. Betona Gömülü Çelik Donatının Korozyonu

Betonarme elemanların içerisindeki çelik çubukların içerisinde, demirin atomik yapısındaki yerel metalürjik farklılıklar sebebiyle farklı enerji alanları yaratmakta ve yan yana yer alan iki bölge arasında elektrik potansiyel fark oluşturmaktadır. [1] Bu sebeplerden dolayı donatının bir bölümü anot, bir bölümü katot gibi davranabilmektedir. Anot ve katodun aynı çelik üzerinde meydana gelmesi ile bu ikisi arasında elektriksel bir çevrim başlar. Böylelikle kısa çevrimli bir elektrolitik hücre oluşmuş olur.



Şekil 2.4: Betona Gömülü Çelikte Meydana Gelen Korozyon Mekanizması

Şekil 2.4'de görüldüğü gibi anot kısmında, demir atomları elektron kaybeder ve bu atomlar demir iyonları (Fe^{+2}) halinde kendini çevreleyen betona taşınırlar. Anot bölgesinde oluşan elektronlar ise donatının katot bölgesine doğru akarlar. Burada beton içerisinde bulunan su ve oksijen ile birleşerek hidroksil iyonu halini alırlar (OH^-). Elektriksel tarafsızlığın (nötrlüğün) sürdürülebilmesi için, demir iyonları beton boşlukları vasıtası ile katot bölgesine geçerler ve burada OH^- iyonları ile birleşerek önce ferros hidroksit, daha sonra ferrik hidroksit'i oluştururlar. Ferrik hidroksit daha sonra Ferrik oksit (pas)'e dönüşür. Bu dönüşüm esnasında açığa çıkan su korozyon sürecinin devam etmesine yardımcı olur. Bu şekilde donatının aşınması

esnasında, donatıya doğru bir elektron akışı, betona doğru bir demir iyonu akışı olur. Korozyon süreci boyunca oluşan reaksiyonlar aşağıda gösterilmiştir.

$$Fe - 2e^- \rightarrow Fe^{+2} \quad \textbf{(2.5)}$$

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)^- \quad \textbf{(2.6)}$$

$$2\,Fe^{+2} + 4(OH)^- \rightarrow 2\,Fe(OH)_2 \quad \text{(Ferros Hidroksit)} \quad \textbf{(2.7)}$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad \text{(Ferrik Hidroksit)} \quad \textbf{(2.8)}$$

$$2\,Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 + 3\,H_2O \quad \text{(Ferrik Oksit)} \quad \textbf{(2.9)}$$

Yukarıda yer alan denklemlerden ve anlatımlardan da anlaşılacağı gibi beton içine gömülü donatının korozyona uğraması için; donatı üzerindeki pasivasyon tabakasının (alkalinite) kaybedilmesi, donatı etrafında su ve oksijen bulunması gerekmektedir. Bu süreç esnasında donatının gömülü olduğu beton tabakası, elektriksel tarafsızlığı sürdürmek amacıyla, iyonların akışını sağlayan köprü vazifesi görür. Beton içerisindeki gözeneklerin yapısı ve kapiler boşlukların doygunluğu, hangi iyonunun beton içerisinde kolaylıkla hareket edebileceğini kontrol eder. Kısacası; iyonların hareketi betonun elektriksel iletkenliği ile ilgilidir.

2.3. Pasivasyon Tabakasının Bozulmasına Yol Açan Etkenler

2.3.1. Karbonatlaşma Etkisi ile Betonun pH Değerinin Düşmesi

pH değeri malzemelerin asit veya alkalin (bazik) karakterlerini 0 – 14 sayıları arasında ifade eden bir değerdir. 7 sayısı pH'ın nötr olduğu değerdir. Bu sayıdan küçük değerlerde asitlik artar, büyük değerlerde ise alkalinite artmaktadır.

Taze betonun pH değeri 12,5 – 13 civarındadır. Betonun alkalinitesinin yüksek olmasının sebebi, çimentodaki C_2S ve C_3S ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksitlerdir [1].

Normal şartlarda, beton içerisinde yer alan çeliğin üst kısmında koruyucu bir oksit tabakasının oluştuğu ve bu tabakanın çeliği korozyona karşı koruduğu daha önce belirtilmiştir. Fakat çeşitli dışsal etkenler sonucunda (karbonatlaşma) beton içerisinde yüksek değerlerde olan pH değeri zamanla azalmaktadır. pH değerinin 9 – 10 gibi

değerlere düşmesi ile birlikte [1], çelik üzerinde koruyucu rol alan oksit tabakası kırılarak, beton içerisindeki çeliği korozyona karşı korunmaz halde bırakmaktadır.

Karbonatlaşma, çimento hamurunun gözeneklerinde, çözünmüş alkalilerle karbondioksit arasında meydana gelen reaksiyonlara dayanır. Hidratasyon reaksiyonları sonucu meydana gelen $Ca(OH)_2$ (sönmüş kireç) betonun pH'ını yüksek tutar. Bu durum korozyon reaksiyonlarını engeller. Ancak havadaki CO_2'in beton yüzeyinden kılcal boşluklar vasıtasıyla iç kısımlara girmesi sonucu sönmüş kirecin $CaCO_3$'e (kalsiyum karbonat) dönüşmesine sebep olur ve ortamın pH'ı düşer. pH'ın düşmesi yukarıda belirtildiği gibi donatıyı saran pasivite tabakasının bozulmasına ve donatının korozyona uğramasına sebep olur. Karbonatlaşma pas payı tabakasını geçip, donatıya ulaştığında korozyon başlar. Aslında bu reaksiyonlar sonucu pH'ın düşmesini sağlayan asıl etmen elde edilen hidroksil iyonlarıdır. Karbonatlaşmanın ilerlemesi çelik donatıyı saran beton tabakasının kalitesine (su/bağlayıcı oranı ve hidratasyon derecesi) ve çimento hamuru içindeki boşlukların doygunluğuna bağlıdır. Şöyle ki; ilerleme oranı kuru ve doygun betonlar için düşükken, betonun %40 – 80 bağıl nem ortamındaki denge konumunda ilerleme maksimum olur [7].

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \textbf{(2.10)}$$

2.3.2. Klor Konsantrasyonunun Etkisi

Beton içerisine, priz hızlandırıcı katkı maddeleri, denizden çıkarılan agregalar, buz eritici kimyasallar ve deniz suyu gibi sebeplerden dolayı nüfuz eden klorür iyonlarının, donatı korozyonunu ne şekilde etkiledikleri kesin olarak ortaya koyulamamıştır [7,17]. Bunun yanında en çok kabul gören düşünce, klorür iyonlarının donatı üzerinde koruyucu etkisi olan pasif oksit tabaksının kırılmasına yol açarak, donatının korozyona açık hale gelmesini sağladıklarıdır. Klorür iyonları, demir iyonları ve su ile reaksiyona girerek, ferros hidroksit ve hidroklorik asit oluştururlar. Oluşan bu hidroklorik asit daha sonra hidrojen ve klorür iyonlarına dönüşerek aynı döngünün tekrar olmasına ve korozyonun daha şiddetli bir hal almasına sebep olurlar [1].

$$Fe^{+2} + 2Cl^- + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \qquad \textbf{(2.11)}$$

$$HCl \rightarrow Cl^- + H^+ \qquad \textbf{(2.12)}$$

Beton içerisine sızan klor iyonları belirli bir eşik değere ulaştığı zaman (0,6 – 1,2 kg Cl-/m³ [1]) çeliğin korozyona başladığı kabul edilir. Bunun yanında sadece serbest klor iyonlarının, donatının korozyona uğramasını sağladığı bilinmektedir. Serbest klorürün, hidroksite oranı 0,6'yı geçtiği zaman pasivite kaybolmaktadır [18].

Yukarıda belirtilen etmenler dışında, çeliğin korozyona uğraması için ortamda su ve oksijenin mutlaka bulunması gerekir. Geçirimliliği fazla olan betonlar içerisine su ve oksijen daha rahat girebilmekte ve beton içerisinde yer alan çelik donatının daha kolay korozyona uğraması sağlanmaktadır.

2.4. Korozyon Ölçüm Yöntemleri

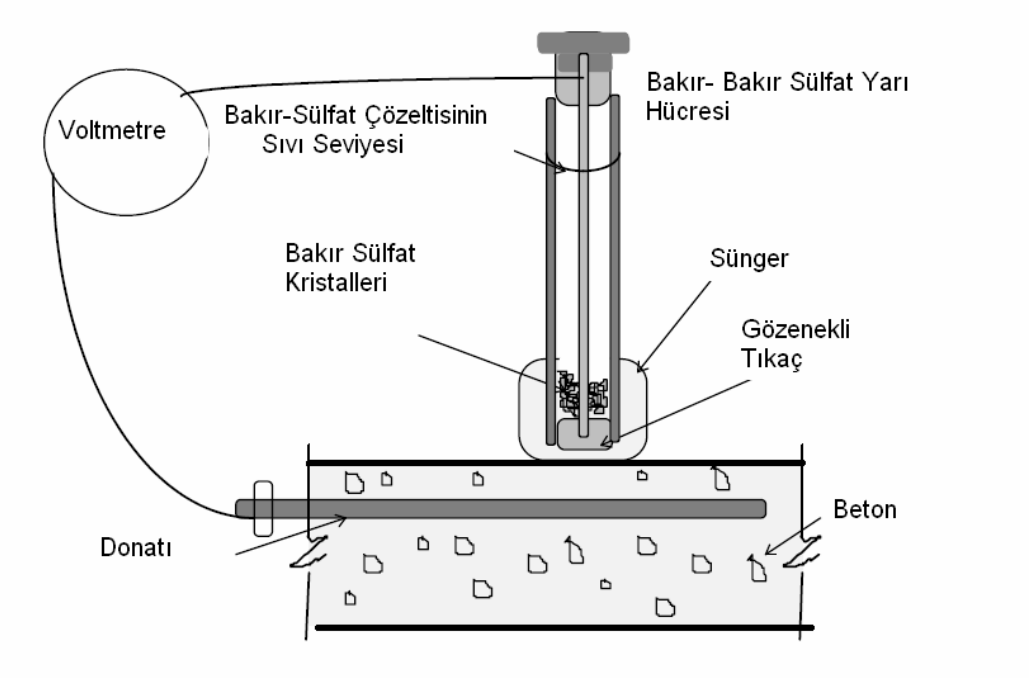
Beton çeliğinin korozyonu, korozyon çok ileri safhalara gelmedikçe (paslanmanın yüzeye çıkması, korozyondan ötürü oluşan çatlaklar) gözlemlenebilir bir olay değildir. Betonarme elemanların servis ömrünü kestirebilmek ve/veya bu elemanların onarıma ve bakıma ihtiyacı olup olmadığını anlayabilmek için, korozyon hızını ve elemanın korozyon aktivitesini bulmaya yardımcı hasarsız bazı teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden pratikte en çok kullanılanları Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Potansiyeli), Lineer Polarizasyon ve AC Empedans teknikleridir.

2.4.1. Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Potansiyeli)

Yarı hücre potansiyeli metodu kullanılarak belirlenen potansiyel ölçümü sayesinde beton yüzeyinde pas lekeleri, çatlama ve parçalanma gözle görülür hale gelmeden önce donatı korozyon aktivitesini gözlemlemek mümkündür. Bu teknik, kullanılan diğer teknikler arasında en basit olanıdır. Teknik, donatının açık devre veya korozyon potansiyelinin belli bir dönem süresince ölçümüne dayanır ve korozyon ihtimali hakkında fikir verir.

ASTM C 876 ve TS EN 934-2'de verilen standart test metodu, Şekil 2.5'de (bakır-bakır sülfat yarı hücresi kullanılarak) gösterildiği gibi uygulanmaktadır. Deney düzeneği yarı hücre, bağlantı kabloları ve yüksek empedanslı bir voltmetreden ibarettir. Deney esnasında çok küçük akımların oluşması ve kaydedilmesi sebebiyle, iç direnci en az 10 mΩ olan yüksek empedanslı bir voltmetre kullanılır. Voltmetrenin + kutbu donatıya, - kutbu yarı hücreye bağlanır. Yarı hücre, gözenekli tıkaç ve belirli bir çözeltide ıslatılmış (sıvı deterjan) nemli sünger vasıtası ile betonla elektriksel

bağlantı yapar. Voltmetre ile potansiyel değer okunur. Tablo 2.1'de yaygın olarak kullanılan birkaç referans elektrotları ile yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde temel alınan ölçütler verilmiştir.



Şekil 2.5: Bakır-Bakır Sülfat Yarı Hücre Düzeneği

Tablo 2.1: Çelik Donatının Farklı Referans Elektrotlarına Göre Yarı Hücre Potansiyellerinin Değerlendirme Ölçütleri

Bakır / Bakır-Sülfat (mV)	**Gümüş / Gümüş-Klorür (mV)**	**St.Hidrojen Elektrotu (mV)**	**Kalomel Elektrot (mV)**	**Korozyon Riski**
E>-200	E>-106	E>+116	E>-126	%90 Risk Yok
-200>E>-350	-106>E>-256	+116>E>-34	-126>E>-276	Belirsizlik Var
E<-350	E<-256	E<-34	E<-276	%90 Risk Var
E<-500	E<-406	E<-184	E<-426	Şiddetli Korozyon

Deneyde kullanılan yarı hücreler genellikle Bakır-Bakır Sülfat Yarı Hücresi, Gümüş-Gümüş Klorür Yarı Hücresi, hidrojen ve kalomel referans elektrotlarıdır. İlgili standarda çeliğin, referans elektrotu olarak bakır-bakır sülfata göre yarı hücre potansiyel değerleri verilmiş olsa da, kısa ömrü ve sık kalibre edilmesi zorunluluğundan dolayı gümüş-gümüş klorür veya kalomel referans elektrotlarının kullanılması tavsiye edilir.

Yarı hücre metodu, devrede herhangi bir akım olmadığından dolayı, bir açık devre ölçümüdür.[19] Donatı korozyona uğradığında, artık elektronlar yarı hücreye doğru akışa geçerler. Bu sırada voltmetrede negatif voltaj okunur. Okunan negatif değerin azalması, donatıda meydana gelen artık elektronların çoğalmasından dolayıdır ki, bu da donatının korozyondan daha fazla etkilendiğini gösterir.

Yarı hücre metodu kullanılarak yapılan ölçümlerin doğru olması, ölçüm yapılan referans elektrotunun alt bölgesinde yer alan donatıya, elektriksel bağlantının doğru bir şekilde yapılamasına bağlıdır. Ayrıca yarı hücre metodu epoksi kaplı betonlarda ve yüzeyi kaplanmış betonlarda uygulanmaz [7].

Yarı hücre ölçümlerinde, ölçüm yapılan noktadaki nem oranı da önemli bir konudur. Standarda göre herhangi bir noktada yapılan potansiyel ölçümleri, 5 dakikalık periyotlar içerisinde, ±20 mV'dan fazla değişim gösteriyorsa betonun yeterince nemli olmadığı kabul edilerek, ön ıslatma işlemi yapılmalıdır. Bu işlem için beton yüzeyinde ölçüm yapılacak noktalara belirli bir sıvı püskürtülür veya belirli bir sıvı emdirilmiş süngerler kullanılır. Okuma esnasında, aynı hücre kullanılarak aynı yerde, hücre bağlantısı kesilip tekrar bağlandıktan sonra alınan iki yarı hücre okuması arasındaki fark 10 mV'dan fazla olmamalıdır. Eğer ölçüm yapılan hücreler farklı ise bu değer 20 mV'dan fazla olmamalıdır [20].

2.4.2. Polarizasyon Direnci (Lineer Polarizasyon)

1950 yılında Stern ve Geary tarafından geliştirilen, temel esası elektrolitik hücreye (beton içerisindeki donatı gibi) dışarıdan çok küçük bir akım uygulandığında, açık-devre potansiyelinde meydana gelen değişimlerin ölçülmesine dayanan lineer polarizasyon yöntemi, 1970 yılından itibaren betonda donatı korozyonunu belirlemede en çok kullanılan yöntem haline gelmiştir.

Stern'e göre [21] korozyon potansiyeli değerinden itibaren ±10 mV (Tafel Bölgesi) aralığında uygulanan çok küçük akımlar ile elektrot potansiyeli arasında doğrusal bir

ilişki bulunmaktadır. Voltajdaki değişim (ΔE) ile elektrotun birim alanına uygulanan akım (Δi) arasındaki bu ilişki (doğrunun eğimi) "polarizasyon direnci (Rp)" olarak tanımlanır ve bu değer Stern-Geary bağıntısı yardımıyla korozyon akımı ile ilişkilendirilir. (Şekil 2.6)

$$\left.\frac{\Delta E}{\Delta i}\right|_{i=0} = R_p \quad \text{veya} \quad I_{kor} = \frac{B}{R_p} \quad [14,17,22] \qquad \textbf{(2.13)}$$

Burada;

ΔE : Potansiyelde Meydana gelen değişimi

Δi : Uygulan Akımı

I_{kor} : Korozyon Hızını (Korozyon akım yoğunluğu) (μA/cm²)

R_p : Polarizasyon Direncini (Ω/cm²)

B : Stern-Geary Sabiti (ortalama 26mV)

B katsayısı polarizasyon eğrisinin özelliklerini yansıtır ve genellikle 26 mV değeri için beton içindeki çelik korozyona uğrar [7]. Bu değer genelde 13 mV ile 52 mV aralığında değişmektedir [17]. Bu katsayının açılımı denklem 2.14'deki gibidir.

$$B = \frac{(\beta a \times \beta c)}{2{,}303 \times (\beta a + \beta c)} \qquad \textbf{(2.14)}$$

Burada βa ve βc anodik ve katodik sabitlerdir.

Her yıl için mm cinsinden korozyon hızı aşağıdaki Faraday Yasasına göre hesaplanabilir [7].

$$CR = 3{,}27 \times \frac{i_{kor} \times M}{z \times \rho} \qquad \textbf{(2.15)}$$

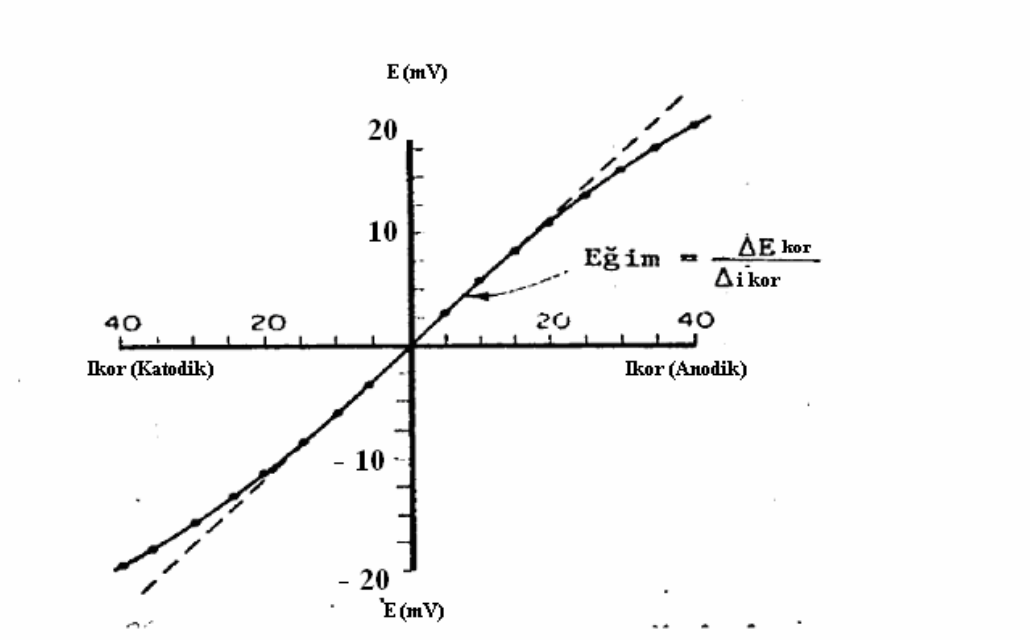
CR: Korozyon Hızı (μm/yıl)

M: Korozyon testine tabi tutulan metalin atomik ağırlığı (g)

ρ: Metalin özgül ağırlığı (gr/cm³)

z: Metalin elektron sayısı

i_{kor}: Korozyon akımı (μA/cm²)

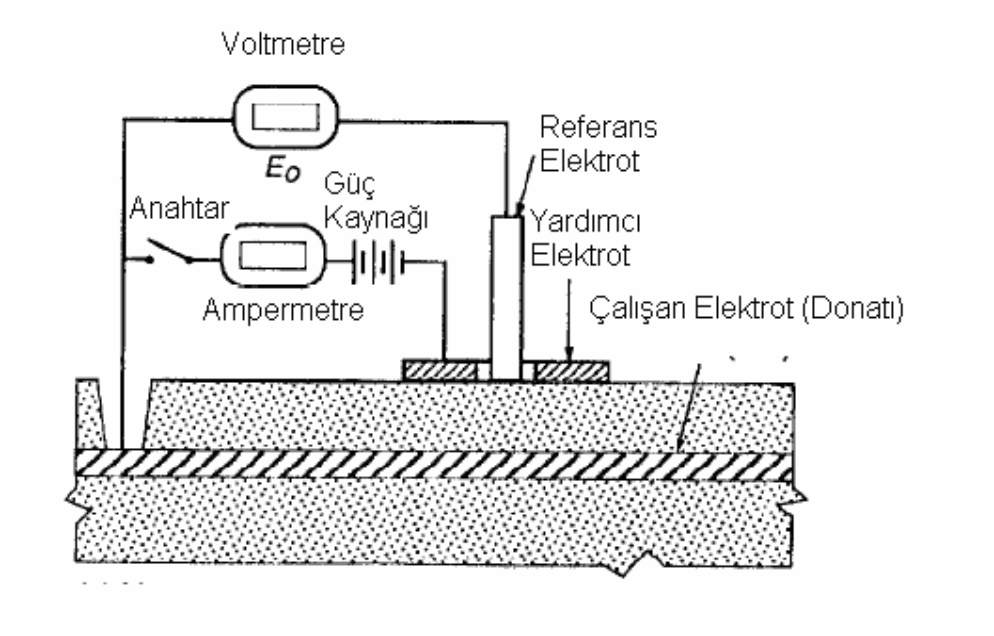


Şekil 2.6: Lineer Polarizasyon Eğrisi

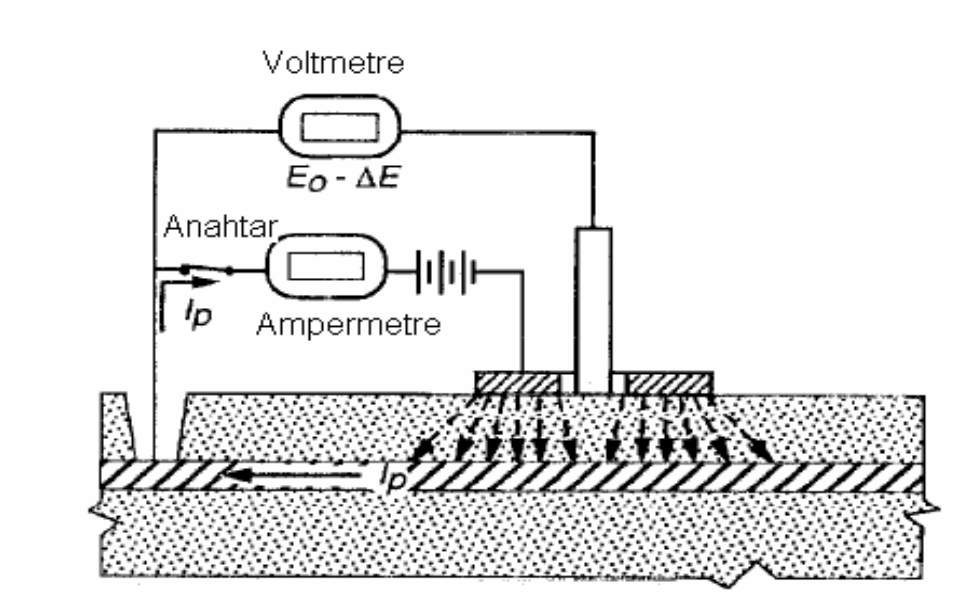
Korozyon aktivitesi açısından korozyon hızını ölçmek için pratikte 2 farklı alet kullanılmaktadır. Bu aletlerden biri 3LP aleti [7] ve Geosica Gecor aletidir [17].

Korozyon aktivitesini ölçmek için kullanılan 3LP aleti Şekil 2.7 ve 2.8'de gösterilmektedir. Düzeneğe 3LP denmesinin sebebi, 3 adet elektrota sahip olmasıdır. Birinci elektrot yarı hücreyi temsil eder ve "referans elektrot" olarak adlandırılır. İkinci elektrot donatıyı temsil eder ve "çalışan elektrot" olarak adlandırılır. Üçüncü elektrot ise "yardımcı elektrot" olarak adlandırılır ve donatının polarizasyon akımını sağlar. Düzenekte ayrıca voltmetre ve ampermetre gibi tamamlayıcı aletler de bulunmaktadır.

Ölçüm yapılırken önce referans elektrota göre donatının açık devre potansiyeli (E_0) ölçülür (Şekil 2.7). Bir sonraki adımda sayaç elektrot ile çalışan elektrot (donatı) arasındaki akım ölçülür (Şekil 2.8). Aynı işlem korozyon potansiyelinde daha büyük potansiyel değerleri için tekrarlanır. Son olarak birim alanda ölçülen akım değerleri ile potansiyel değerleri kullanılarak grafik çizilir. Grafikteki noktaların arasından en iyi doğru geçirilerek, doğrunun eğimi bulunur. Bu eğim polarizasyon direncini vermektedir.



Şekil 2.7: 3LP Düzeneği ile Açık Devre Akımının Ölçülmesi



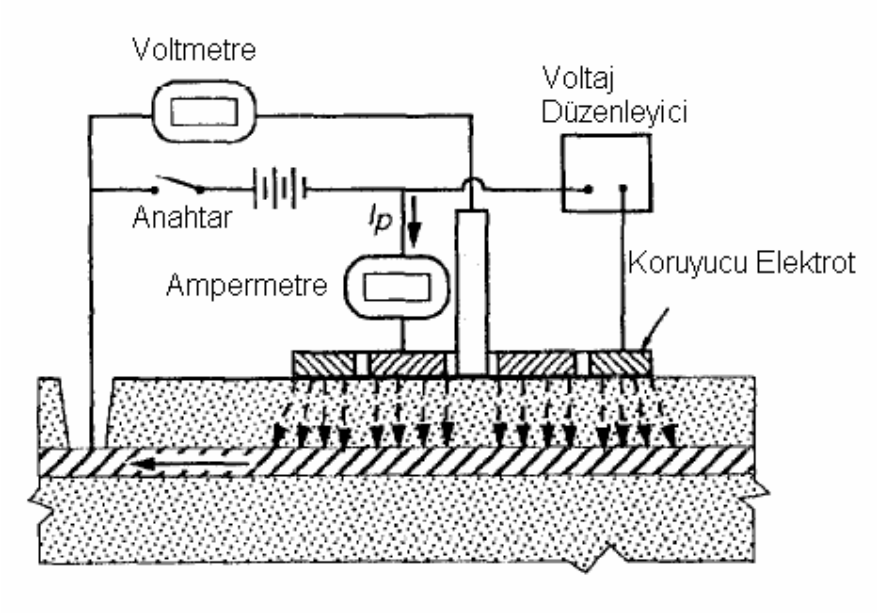
Şekil 2.8: 3LP Düzeneği ile Küçük Değişimler Meydana Getirilmiş Akımın Ölçülmesi

Gecor düzeneği de prensipte 3LP düzeneği ile aynı çalışır. Bu iki düzenek arasındaki fark Gecor düzeneğinde, sayaç elektrotunun uyguladığı akımın etki alanını sınırlandırmak için koruyucu halkalar içermesidir (Şekil 2.9). Bu sayede sayaç elektrotundan donatıya giden akım dağılmayacak ve akımın etkilediği alan daha kesin bir şekilde tespit edilebilecektir. Bir diğer fark ise 3LP düzeneği kullanıcıya bağımlı bir düzenek olmasına rağmen, Gecor düzeneğinde korozyon hızı alet tarafından direkt ölçülür. Ayrıca her iki alet de korozyon akım yoğunluğunu hesaplarken farklı Tafel Eğrileri kullanmaktadırlar. Bu sebeple her iki alet için farklı değerler ortaya çıkmaktadır. Tablo 2.2'de her iki alet için ölçülen değerlere göre, korozyon hızının yorumlanması için verilen ölçütler yer almaktadır.

Polarizasyon direnci yöntemi kullanılarak yapılan ölçümler, test anındaki korozyon hızını temsil etmektedir. Bir yapının herhangi bir noktasındaki korozyon hızı, betonun nem içeriği, oksijenin varlığı ve sıcaklık gibi bir çok faktörlere bağlıdır. Bu nedenle yapının herhangi bir noktasında yapılan ölçümlerde, mevsimlere göre farklılıklar meydana gelebilmektedir. Bu değişiklikler, birden fazla yılı kapsayan çoklu ölçümlerle gözlemlenmelidir.

Tablo 2.2: Gecor ve 3LP Sonuçlarını Yorumlama Ölçütleri

I_{kor} ($\mu A/cm^2$)	Gecor Düzeneğine Göre Korozyon Riski	I_{kor} ($\mu A/cm^2$)	3LP Düzeneğine Göre Korozyon Riski
<0,1	Pasif (İhmal Edilebilir)	<0,2	Hasar Beklenmez
0,1-0,5	Düşük	0,2-1,0	10-15 Yıl İçinde Hasar Oluşabilir
0,5-1	Orta	1,0-10,0	2-10 Yıl İçinde Hasar Oluşabilir
>1	Yüksek	>10,0	2 Yıldan Az Sürede Hasar Oluşabilir



Şekil 2.9: Gecor Aletinin Çalışma Prensibi

2.4.3. Beton Özdirenci (Resistivite)

Beton içerisindeki donatı, pasivitesini kaybettikten sonra, korozyonun süreci, beton içerisinde oksijenin bulunmasına ve betonun elektriksel direncine bağlıdır. Betonun elektriksel direnci, anodik ve katodik bölgelerden kopan iyonların, beton içerisine geçebilmesi ile doğrudan ilgilidir. Betonun Elektriksel direnci, betonun boşluk yapısına ve betonun nem oranına bağlıdır. Betonun Özdirenci (Resistivite); sayısal olarak, malzemenin birim hacimdeki elektriksel direnci olarak tanımlanabilir [7].

Yarı hücre deneyi esnasında, değerlemede yardımcı olması açısından betonun özdirencinin belirlenmesinde fayda vardır. Şöyle ki; yarı hücre okumalarında korozyon potansiyeli yüksek olan betonların, özdirencinin yüksek olması durumunda, korozyon hızının düşük olabileceği yorumlanabilir. Beton ne kadar boşluksuz bir yapıda ise özdirenci o kadar yüksek değerler almaktadır. Buda beton içerisindeki donatıda korozyon oluşumunu olumlu yönde etkiler

Özdirenç ölçümü ile ilgili ASTM veya başka bir sistemde hazırlanmış bir standart yoktur. Wenner (1915) tarafında geliştirilen bir metot, bu konuda başarı ile uygulanmaktadır [7] (Şekil 2.10). Bu düzenekte, beton yüzeyine eşit aralıklarla yerleştirilmiş 4 adet elektrotun beton ile elektriksel bağlantı yapması sağlanır. (iletken kremler sürülerek) En dıştaki elektrotlar, alternatif akım üreten bir kaynağa

bağlıdır. İçteki elektrotlara ise bir voltmetre bağlanır. Betonun öz direnci aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$B\ddot{O} = \frac{2 \times \pi \times s \times V}{I} \qquad \textbf{(2.16)}$$

Burada;

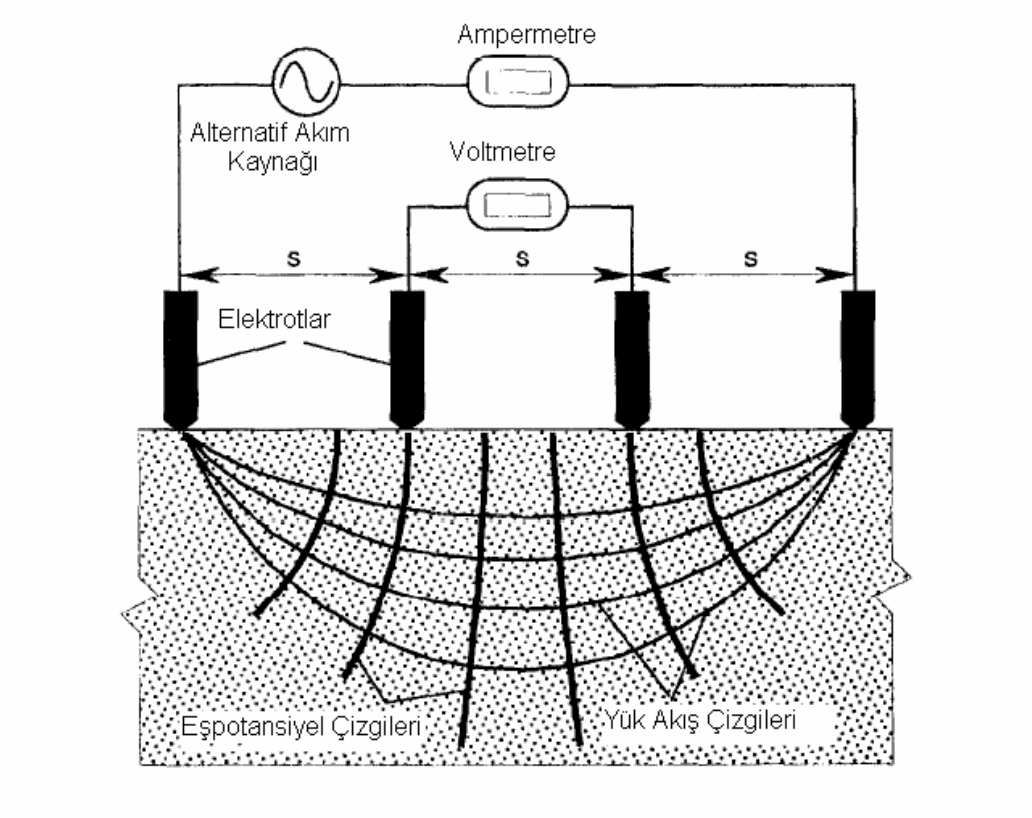
BÖ: Betonun Özdirenci

s: elektrot açıklıları

V: Ölçülen Voltaj Değeri

I: Dıştaki elektrotlar arasındaki akım

Tablo 2.3'de Feliu ve Bungey'e göre ölçülen özdirenç değerleri ile betonda korozyon riski arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Wenner'in Geliştirdiği Beton Özdirenci (Resistivite) Ölçüm Yöntemi

Tablo 2.3: Betonun Özdirenci İle Korozyon Riski Arasındaki İlişki [7].

Feliu (1996)'ya Göre		**Bungey (1989)'a Göre**	
Özdirenç (kΩ.cm)	**Korozyon Riski**	**Özdirenç (kΩ.cm)**	**Korozyon Riski**
>100-200	İhmal edilebilir. (Beton Kuru)	>20	Düşük
50-100	Düşük Korozyon Hızı	10-20	Düşük/Orta
10-50	Ortadan Yükseğe Doğru Korozyon Hızı	5-10	Yüksek
<10	Özdirenç Korozyon Hızını Kontrol Edemez Durumda	<5	Çok Yüksek

2.4.4. AC Empedans Yöntemi

AC Empedans Tekniği, özellikle empedansın yüksek olduğu veya iletkenliğin çok düşük olduğu durumlarda polarizasyon direnci ile direnç karakteristikleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu teknikte lineer polarizasyon tekniğinden farklı olarak, doğru akım yerine, alternatif akım kullanılır. Doğrusal akım yerine kullanılan alternatif akım sayesinde, genellikle çok düşük frekanslarda ölçümler gerçekleştirmek mümkündür. Betona sinüzoidal sinyaller gönderilerek, oluşan ΔI tepkileri ölçülür ve kaydedilir. AC Empedans tekniğinde kullanılan cihazın oldukça kompleks ve pahalı olması ve arazi için uygun olmaması (deney süresinin uzun olması), AC empedans tekniğinin LPR (Lineer Polarizasyon Tekniği) tekniğine göre en önemli dezavantajıdır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan tez çalışmasında, farklı ikamelerde betona katılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun, betonun durabilite ve basınç dayanımı özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda taze beton üzerinde işlenebilme ve birim ağırlık deneyleri ile sertleşmiş betonda basınç dayanımı, kılcal su emme deneyi, hızlı klorür geçirimliliği deneyleri yapılmıştır. Ayrıca beton içerisindeki donatının korozyon mekanizması ile ilgili lineer polarizasyon, yarı hücre potansiyeli ve özdirenç deneyleri yapılarak korozyon hızı ve korozyon seviyesi araştırılmıştır. Deney esnasında değişkenlerin alt ve üst sınırları dozaj için 300 kg/m³ - 400 kg/m³, su/bağlayıcı oranı için 0,48 – 0,57 ve cüruf/bağlayıcı oranı için 0,17 – 0,68 olarak alınmıştır. Bu sınırlar dikkate alınarak Merkezi Karma Tasarım Yöntemi kullanılmış ve 20 farklı karışımda beton numuneleri hazırlanmıştır. Her üretilen beton karışımı için belirli işlenebilme değerlerini sağlayabilmek amacı ile farklı oranlarda polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Agregalar

Yapılan çalışmada beton karışımlarında kullanılmak üzere iri agrega olarak Kırmataş II ve Kırmataş I, ince agrega olarak ise kırmataş kumu ve doğal kum kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak agregaların özgül ağılıkları belirlendikten sonra (Tablo 3.1.), agregalardan alınan numuneler elek analizine tabi tutularak, granülometri eğrileri belirlenmiştir. Yapılan deneylerde elde edilen granülometri deneyi sonuçları Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

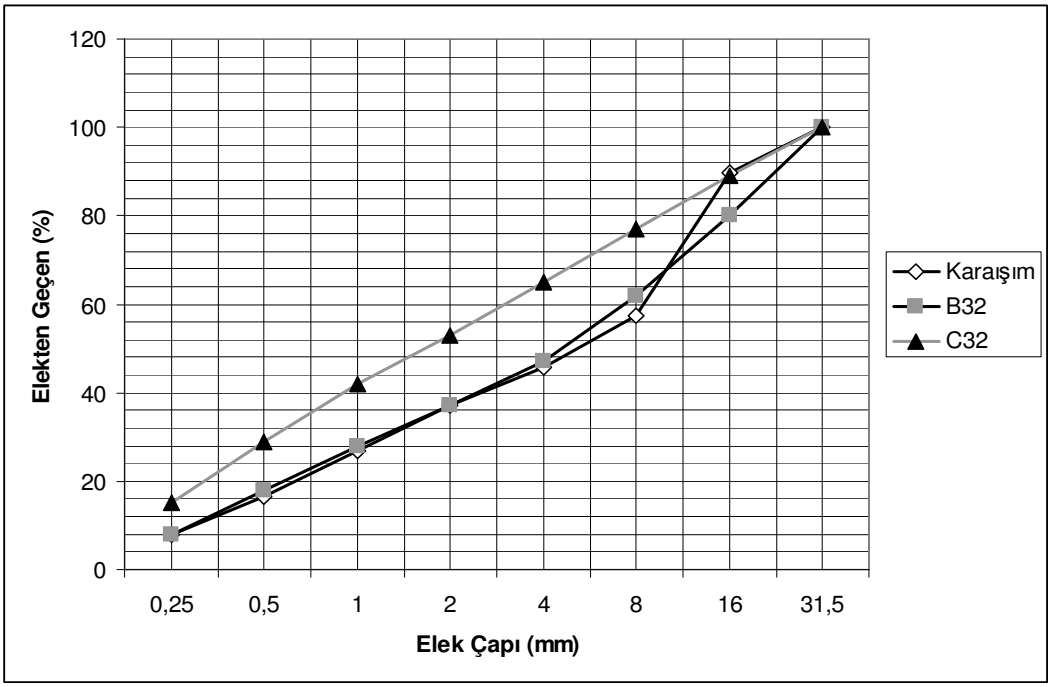
Tablo 3.1: Agrega Özgül Ağırlıkları

Kırmataş II (gr/cm³)	**2,72**
Kırmataş I (gr/cm³)	**2,71**
Kırmataş Kumu (gr/cm³)	**2,70**
Doğal Kum (gr/cm³)	**2,65**

Tablo 3.2: Granülometri Deneyi Sonuçları

Elek Ebadı (mm)	% Geçen (Kırmataş II)	% Geçen (Kırmataş I)	% Geçen (Kırmataş Kumu)	% Geçen (Doğal Kum)
31,5	100	100	100	100
16	69,7	100	100	100
8	0,7	58,2	100	100
4	0,2	7	99,7	96
2	0,2	0,7	82,8	81,8
1	0	0	56,5	62,4
0,5	0	0	34,7	39,1
0,25	0	0	22,1	12,8

Yapılan deneyler sonucunda, beton karışım hesaplarında kullanılacak agregaların karışım oranları belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.1'de agregaların granülometri eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Beton Üretiminde Kullanılan Agrega Oranlarına Göre Karışım Eğrisi

Tablo 3.3: Deneyde Kullanılan Agregaların Karışım Oranları

Kırmataş II (%)	**34**
Kırmataş I (%)	**21**
Kırmataş Kumu (%)	**23**
Doğal Kum (%)	**22**

3.1.2. Çimento

Söz konusu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan çimento, Akçansa Çimento Sanayi Büyükçekmece Fabrikası'nda üretilmiş, TS EN 197-1 / Mart 2002 Standardında belirtilen, Cem I / 42,5 R tipinde normal portland çimentosudur. Kullanılan çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler tablo 3.4, 3.5 ve 3.6'da belirtilmiştir. Ayrıca çimentonun gerçek özgül ağırlığını bulmak için volumetre içerisine seviye çizgisine kadar benzin doldurulmuş, üzerine önceden tartılmış 100 gr çimento eklenmiştir. Benzin seviyesinde meydana gelen değişimden yararlanarak 100 gr çimentonun hacmi hesaplanmıştır. Bu iki bilgi göz önüne alınarak çimentonun gerçek özgül ağırlığı bulunmuştur.

Tablo 3.4: TS EN 196-3 ve TS EN 196-6 Standartlarına Göre Belirlenmiş Portland Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Özgül Ağırlık (gr/cm³)	**3,15**
Le Chatelier (mm)	**1**
Özgül Yüzey (Blaine) (cm²/gr)	**3683**
45 μm Elek Kalıntısı (%)	**7,9**
90 μm Elek Kalıntısı (%)	**0,6**
Priz Başlama Süresi (dakika)	**142**
Priz Bitiş Süresi (dakika)	**191**

Tablo 3.5: TS EN 196-2 Standardına Göre Belirlenmiş Portland Çimentonun Kimyasal Özellikleri

SiO_2 (%)	**20,14**
Çözünmez Kalıntı (%)	**0,41**
Al_2O_3 (%)	**5,04**
Fe_2O_3 (%)	**3,78**
CaO (%)	**63,92**
MgO (%)	**1,35**
SO_3 (%)	**2,84**
Kızdırma Kaybı (%)	**1,35**
Klorür (Cl^-) (%)	**0,0407**
Na_2O / K_2O (%)	**0,23 / 0,84**
Tayin Edilmeyen (%)	**0,47**
S.CaO (%)	**1,35**
LSF	**0,96**
C_3S	**54,23**
C_2S	**16,91**
C_3A	**6,97**
C_4AF	**11,50**

Tablo 3.6: Portland Çimentosunun Basınç Dayanımı Değerleri (40x40x160 mm kalıplar, 1 kısım çim : 3 kısım CEN ref. Kumu, 0,50 su/çim)

GÜN	**Basınç Dayanımı (Mpa)**
Erken Dayanım 2 Gün	**26,8**
Erken Dayanım 7 Gün	**39,4**
Erken Dayanım 28 Gün	**52,1**

3.1.3. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Deney aşamasında, Akçansa Çimento Sanayi Büyükçekmece Fabrikası'nda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan cüruf oranlarının alt sınırı %17 (bağlayıcı oranına göre) ve üst sınırı %68 (bağlayıcı oranına göre) olarak belirlenmiştir. Kullanılan cürufa ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.7 ve 3.8'de belirtilmiştir. Ayrıca kullanılan cürufun volumetre yardımı ile özgül ağırlığı hesaplanmış ve Tablo 3.8'de belirtilmiştir.

Tablo 3.7: Deneyde Kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri

SiO_2 (%)	**38,02**
Çözünmez Kalıntı (%)	**-**
Al_2O_3 (%)	**10,12**
Fe_2O_3 (%)	**2,75**
CaO (%)	**34,06**
MgO (%)	**10,16**
SO_3 (%)	**3,13**
Kızdırma Kaybı (%)	**0,00**
Klorür (Cl^-) (%)	**0,0298**
Na_2O (%)	**0,52**
K_2O (%)	**1,10**
$CaCO_3 + MgCO_3$ (%)	**-**
H_2O (%)	**0,00**

Tablo 3.8: Deneyde Kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Özgül Ağırlık (gr/cm³)	**2,92**
Özgül Yüzey (Blaine) (cm²/gr)	**4520**
0,045 mm Elek Kalıntısı (%)	**0,3**
0,090 mm Elek Kalıntısı (%)	**0,0**
0,200 mm Elek Kalıntısı (%)	**0,0**
Aktivite Test Değeri (N/mm²)	**13,3**

3.1.4. Kimyasal Katkı Maddesi

Deney esnasında sika firması tarafından üretilen, Sika ViscoCrete -5W olarak adlandırılan, modifiye polikarboksilat esaslı, 3. nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddesi kullanılmıştır. Söz konusu katkı maddesi klor içermemesinin yanında, kendiliğinden sıkışma, erken yüksek dayanım sağlama, su azaltma, geçirimsizlik azaltma ve karbonatlaşmayı önleme gibi pek çok avantaja sahiptir. Tablo 3.9'da söz konusu katkı maddesine ait fiziksel özellikler belirtilmiştir.

Tablo 3.9: Deneyde Kullanılan Kimyasal Katkıya Ait (Sika ViscoCrete -5W) Fiziksel Özellikler

Tipi	**Modifiye Polikarboksilat Esaslı Sıvı**
Renk	**Açık Kahverengi**
Yoğunluk	**1,11 ± 0,02 kg/lt**

3.1.5. Donatı Çeliği

Deney esnasında korozyon ölçümü yapılacak numuneler içerisine yerleştirilmek üzere, 10 mm çapında, nervürlü donatı çeliği kullanılmıştır. Çelik donatılar 30'ar cm uzunluklarda kesilerek, her iki ucundan 10'ar cm PVC streç film ile kaplanmıştır. Numunelerin ortasında kalan 10 cm'lik kısım Sikadur-330 Epoksi reçinesi ile kaplanmıştır. Numuneler betona gömülürken PVC streç filmler çıkarılarak yerleştirilmiştir. Böylelikle beton içerisinde korozyon etkisine maruz kalacak donatının alanını hesaplamak mümkündür. Beton içerisinde 10 cm açıkta donatı olacağından ve donatının çapı 10 mm olacağından dolayı, korozyona maruz kalacak donatı alanı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

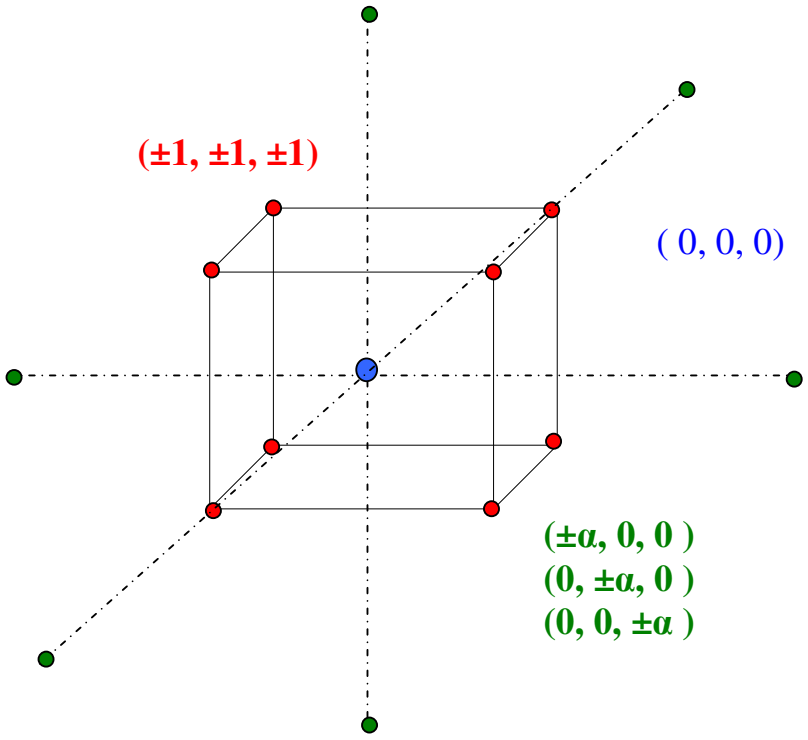
Л x d x Açık donatı uzunluğu = 3,14 x 10 x 100 = 3140 mm² = 31,4 cm² **(3.1)**

3.2. Merkezi Karma Tasarım Yöntemi

Deney için üretilecek betonlar, "Merkezi Karma Tasarım Yöntemi"ne göre belirlenmiştir. Merkezi Karma Tasarım Yöntemi, bir süreci etkileyen faktörler ile bu sürecin bitiminde elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkiyi inceleyen bir tekniktir. Deney esnasında bu teknik kullanılarak 20 farklı karışım elde edilmiştir. Bu karışımlardan 6 adedi hata payının belirlemek amacı ile aynı oranlara sahiptir ve her biri değişkenlerin aritmetik ortalamalarından oluşmaktadır. Geriye kalan 14

karışımdan 8 adedi ise 3 farklı değişkenin alt ve üst sınırları kullanılarak oluşturulmuş karışımlardır. Bu çalışmada 3 farklı değişken için 2 farklı alt-üst sınır değeri mevcut olacağından, bu değişkenler $2^i = 2^3 = 8$ farklı sırada dizilebilirler. Geriye kalan 6 farklı karışım ise bir parametrenin ortalama değerinin, aynı parametreye ait sınır değerlere olan uzaklığının, α gibi bir katsayı ile çarpılması sonucu çıkan sayının, ortalama değere eklenip çıkarılması ile oluşan değer ile diğer 2 farklı parametrenin ortalama değerlerinin alındığı karışımlardır. "α" katsayısı $[2^k]^{1/4}$ ifadesi ile hesaplanmaktadır. k deneyde kullanılan değişken katsayısını temsil etmektedir. Yapılan çalışmada k=3 olduğundan, α=1,68179 olarak alınmıştır. Söz gelimi çimento üst sınırı 400, alt sınırı 300 olduğunda, ortalama değeri 350 olmaktadır. Bu değerin alt ve üst sınırlara uzaklığı 50 olmaktadır. 50 x 1,68179 = 84,0895 gibi bir rakam çıkmaktadır. Bu rakam ortalama değere eklenip, çıkarılırsa 434,0895 ile 265,9105 gibi 2 farklı değer elde edilmektedir. Bu değerlerden her biri, diğer 2 parametrenin ortalama değerleri ile bir karışım oluşturmaktadır. 3 farklı parametre olduğundan bu şekilde 6 farklı karışım meydana gelmektedir. Böylelikle 3 farklı değişken için, Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre toplam 20 adet karışım meydana gelmektedir (Şekil 3.2).

Karışımlar oluşturulduktan sonra, beton üretimlerine geçilmiş ve en son olarak denesel çalışma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen bilgiler, Merkezi Karma Tasarım Yönteminde oluşturulmuş karışım oranları ile eşleştirilmiş ve her deney için, karşım oranlarının değişmesi ile (değişkenlerin değişmesi), o deneyden elde edilen sonuçların ne şekilde etkilendiğini gösteren fonksiyonlar oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlara ait grafikler çizilmiştir. Merkezi Karma Tasarım Yöntemi'ne göre elde edilen sonuçlar ve çizilen grafikler sonuçlar kısmında verilmiştir.



Şekil 3.2: Merkezi Karma Tasarım Yöntemi

3.3. Beton Karışımları

Yapılan çalışmada öncelikle Merkezi Karma Tasarım Yöntemi için gerekli olan alt ve üst değerler belirlenmiştir. Bunun için TS 802 Beton Karışım Hesaplarına uygun ön üretimler yapılmış ve sonuçlar irdelenerek maksimum ve minimum kullanılabilecek bağlayıcı, su/bağlayıcı, cüruf/bağlayıcı oranları belirlenmiştir (Tablo 3.10).

Tablo 3.10: Karışım Parametreleri ve Değişim Aralıkları

Parametre	Alt Uç Değer	Alt Değer	Orta Değer	Üst Değer	Üst Uç Değer
Bağlayıcı (Dozaj)	265,91	300	350	400	434,09
Cüruf /Toplam Bağlayıcı	0,0	0,17	0,425	0,68	0,854
Su/ Toplam Bağlayıcı	0,449	0,48	0,525	0,57	0,601

Sınır değerlerinin belirlenmesinde sonra, bu değerler kullanılarak Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre 20 farklı karışım hazırlanmıştır. (Tablo 3.11)

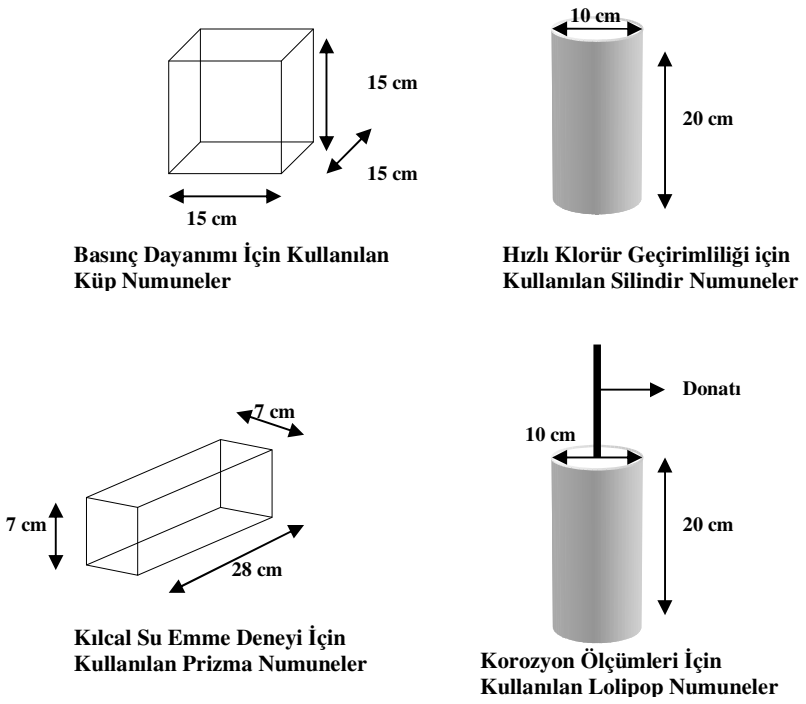
Tablo:3.11: Beton Karışım Oranları

Numune No	Toplam Bağlayıcı kg/m^3	Su/Toplam Bağlayıcı	Cüruf/Toplam Bağlayıcı
C1	300	0,570	0,170
C2	350	0,525	0,854
C3	434,09	0,525	0,425
C4	400	0,480	0,680
C5	350	0,449	0,425
C6	265,91	0,525	0,425
C7	350	0,525	0,425
C8	350	0,601	0,425
C9	300	0,480	0,170
C10	400	0,480	0,170
C11	400	0,570	0,170
C12	300	0,570	0,680
C13	300	0,480	0,680
C14	350	0,525	-0,004
C15	400	0,570	0,680
C16	350	0,525	0,425
C17	350	0,525	0,425
C18	350	0,525	0,425
C19	350	0,525	0,425
C20	350	0,525	0,425

Bu çalışmada her beton karışımı için, basınç dayanımı, hızlı klorür geçirimliliği, kılcal su emme deneyi ve korozyon ölçümü için toplam 16 adet numune hazırlanmıştır. Basınç dayanımı için 3 adet su ve 3 adet hava olmak üzere toplam 6 adet küp numune, hızlı klorür geçirimliliği deneyi için 1 adet hava ve 1 adet su olmak üzere 2 adet silindir, kılcal su emme deneyi için 1 adet hava ve 1 adet su olmak üzere 2 adet prizma ve korozyon ölçümüm deneyleri için 3 adet hava ve 3 adet su olmak üzere, içerinse donatı gömülü toplam 6 adet lolipop numune hazırlanmıştır. Numune boyutları Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Numuneler isimlendirilirken, öncelikle beton numarasını ve içerisindeki mineral katkı maddesini belirten ilk kod (C1, C2 vb), daha sonra ise numunenin kür koşulunu temsil eden ikinci kod yer alır. (Hava için H, Su için S) En son kullanılan kod ise numunenin sıra sayısını belirtmektedir. (1, 2, 3) Korozyon ölçümü yapılacak numuneler için son kod D1, D2, D3…. gibi

girilmiş belirlenmiş olup, burada D donatı anlamına, numara ise donatı numarasına karşı gelmektedir.

Betonlar üretilirken belirlenen oranlarda, malzemeler betonyer vasıtası ile karıştırıldıktan sonra, önceden yağlanmış kalıplara dökülerek sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Numuneler kalıplar içerisinde 1 gün süre ile bekledikten sonra, kalıptan çıkarılıp kür koşuluna göre hazırlanmış bölümlere yerleştirilmiştir. Su numuneleri 20±2ºC'de, normal çeşme suyu ile doldurulmuş havuzlarda, hava numuneleri ise havada 90 gün boyunca kür edilmiştir. Kür süresinin tamamlayan su numuneleri deneyden önce, 1 gün havada bekletilmiştir. Cürufun erken dayanım kazanma hızı yavaş olduğundan dolayı bazı betonlara ait numuneler kalıp içerisinde 2-3 gün bekletilmek zorunda kalınmıştır. Böylelikle numunenin sertleşmesi sağlanmış ve kalıptan çıkarılırken zarar görmesi engellenmiştir.



Şekil:3.3: Üretilen Numuneler ve Boyutları

3.4. Deneyler

3.4.1. Taze Beton Deneyleri

3.4.1.1. İşlenebilme (Slump Deneyi)

Betonun kıvamının belirlenmesinde, literatür kısmında belirtildiği gibi TS EN 12350-2 standardına uygun bir şekilde çökme deneyi (slump deneyi) yapılmıştır. Beton karma işlemi bittikten sonra, önceden belirlenmiş kıvam sınırlarının sağlanıp, sağlanamadığının saptanılabilmesi ve bu sebeple kullanılacak kimyasal katkı miktarının belirlenmesinde slump deneyi (çökme deneyi) önemli bir rol oynamaktadır. Bu deney esnasında hazırlanan beton karışımlarının çökme değerlerinin 12 cm ile 18 cm arasında kalması için kimyasal katkı (Sika ViscoCrete - 5W) kullanılmıştır.

Beton karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, çökme (slump) deneyi yapılarak işlenebilirlik ölçülmüştür.

3.4.1.2. Birim Ağırlık Deneyi

Üretim aşamasında, karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, taze beton, hacmi ve ağırlığı belirli olan kalıp içerine yerleştirilerek toplam ağırlığı tartılmıştır. Toplam ağırlıktan kalıp ağırlığı çıkarılarak betonun ağırlığı bulunmuş ve önceden belli olan kap hacmine bölünerek taze betonun birim ağırlığı hesaplanmıştır.

3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.4.2.1. Basınç Dayanımı

Önceden hazırlanmış olan, 15 cm x 15 cm x 15 cm boyutlarındaki küp numuneler, kür sürelerini tamamladıktan sonra, tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney İ.T.Ü. Yapı Malzemeleri Laboratuarı'nda gerçekleştirilen deneylerde, numuneler ortalama bir hızla yüklenmişlerdir.

3.4.2.2. Hızlı Klorür Geçirimliliği Deneyi (ASTM 1202-97)

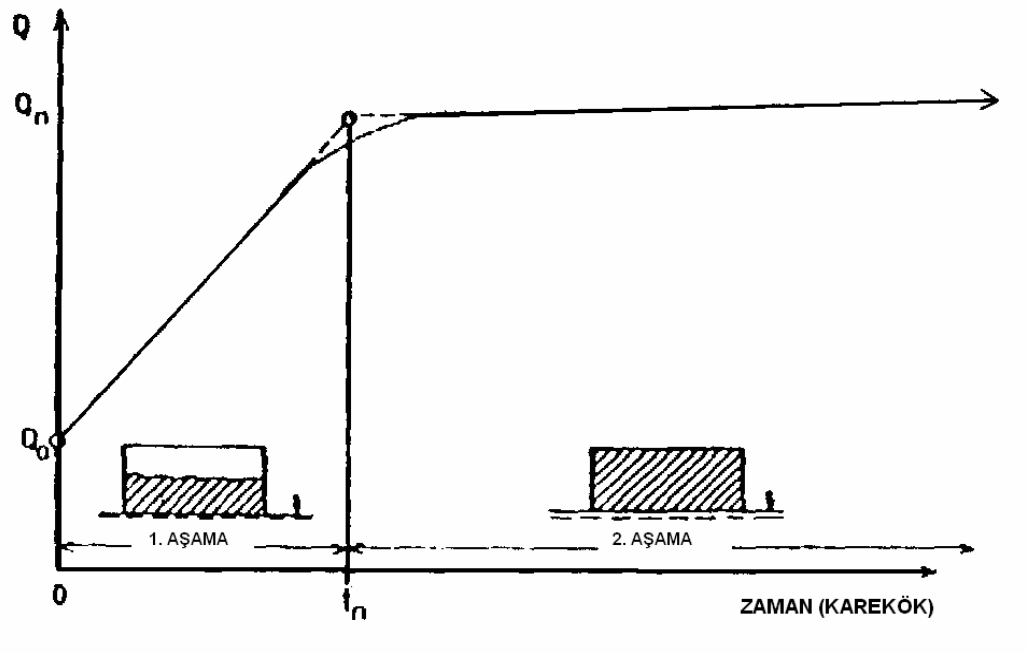
Bu deney için önceden hazırlanan 20 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında silindir numuneler kullanılmıştır. Numuneler 90 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra, başta ve sondaki fazlalıkları ayrılarak 5 cm uzunluğunda 3 eşit parçaya ayrılmışlardır. Bu parçaların her biri etüvde 24 saat süre ile kurutulduktan sonra, dış

yüzeyleri epoksi malzeme ile kaplanarak vakum haznesine yerleştirilmiştir. Numuneler bu hazne içerisinde 1 mm Hg'den daha düşük bir basınç altında 3 saat süre ile vakum işlemine tabi tutulduktan sonra, basınç değiştirilmeden, 1 saat süre boyunca suya (saf su) doyurulmuşlardır. Vakum ve doyurma işlemi tamamlanan her numune saf su içerisinde 18±2 saat süre bekletilmiştir. Bu süreçten sonra her numune deney hücrelerine yerleştirilmiş ve sızıntı önlenmesi için kenarları çabuk kuruyan silikon malzeme ile kapatılmıştır. Hücrelerden birine %3'lük NaCl çözeltisi, diğerine ise 0,3 N NaOH çözeltisi konulduktan sonra, düzeneğe 60 V'luk gerilim uygulanmıştır. Deneyin başlama süresinden, 6 saatlik bitiş süresine kadar, her 30 dakikada bir devreden geçen akım ölçülerek kaydedilmiştir. Kaydedilmiş değerler standartta belirtilen formüle göre coloumb'a çevrilerek sonuçlar elde edilmiştir.

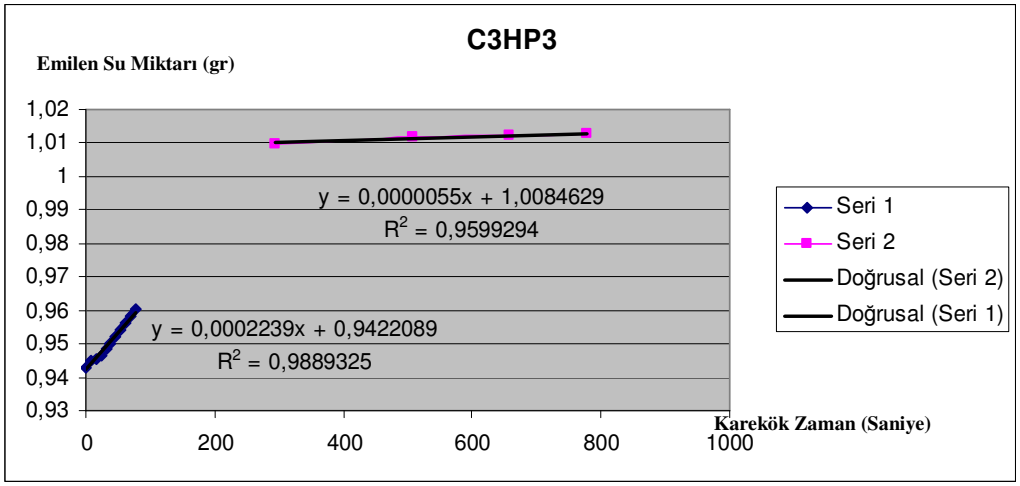
3.4.2.3. Kılcal Su Emme Deneyi

Bu deneyde kullanılmak üzere 7x7x28 cm boyutlarında prizma numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 90 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra, numuneler baştan ve sondan 9,5 cm uzunlukta işaretlenerek kesilir. (0,5 cm kesici bıçağın eni için bırakılır. Numune boyutları 9 cm olmalıdır.) Ortada kalan son numune olduğu gibi kullanılır. Su ve hava için prizma numunelerden 3'er adet 9 cm numune çıkarılır. Numuneler 24 saat süre boyunca 70ºC'lik etüvde kurutulduktan sonra, su yüzeyine deyecek yüzeyin kenarları belirli bir yüksekliğe kadar parafin ile kaplanır. Hazırlanan numunelerin kuru ağırlıkları belirlendikten sonra, belirli seviyede su dolu tepsiye konulur. Belirli aralıklarda, numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülür. Bu deneyde ölçümler Fagerlund'un yaptığı çalışmada olduğu gibi ölçümler 1 haftalık süreç için alınmıştır.

Alınan ölçümler kullanılarak, emilen su miktarı ve geçen sürenin karekökü arasında Şekil 3.4 ve 3.5'de olduğu gibi grafik çizilmiştir. Grafik çizilirken ilk 100 dakikalık bölüm 1. aşama olarak alınmış, bu süreden sonra yapılan 1., 3., 5. ve 7. gün ölçümleri 2. aşama olarak alınmıştır. Her iki aşamanın grafikte teğetleri kesiştirilerek, kesiştiği noktadaki t_n değerleri hesaplanmıştır. Bulunan t_n değeri ve bu değere karşılık gelen Q_n (Ağırlık) değeri kullanılarak kılcallık katsayısı (k) ve etkin porozite değeri(ε_e) hesaplanmıştır.



Şekil 3.4: Kılcal Su Emme Deneyi'nde Fagerlund'a Ait Grafik



Şekil 3.5: Kılcal Su Emme Deneyi'nde Elde Edilen Grafik

3.4.2.4. Lineer Polarizasyon, Yarı Hücre Ve Özdirenç Ölçümleri (Korozyon Hızı ve Potansiyeli Ölçümleri)

Korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve özdirenç ölçümlerini kapsayan korozyon ölçümleri için içerisinde çelik donatı gömülü lolipop numuneler kullanılmıştır. Numuneler 90 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra ilk ölçümleri alınmıştır. İlk ölçüm işleminden sonra numuneler NaCl çözeltisi içerisinde 1 hafta bekletilmiş, çözeltiden çıkarılıp 1 hafta süre boyunca da havada bekledikten sonra tekrar ölçüm alınmıştır. Bu çevrim her ölçüm öncesi tekrarlanmıştır.

Ölçüm için Gecor 8 aleti kullanılmıştır. Bu düzenek, ölçüm için gerekli dataların girildiği, yapılan ölçümleri değerlendiren ve kaydeden ve üzerinde bulunan ekrandan ölçüm sürecini takip edebildiğimiz "Korozyon Hızı Ölçer" olarak adlandırılan ana kısım, ölçüm yapmamıza yarayan disk ve silindir şekilli sensorlar ve ana kısım ile sensorları birbirine bağlayan kablodan oluşmaktadır. Yardımcı araçlar olarak pili şarj etmeye yarayan şarj aleti ve bu aletin bağlantı kabloları bulunmaktadır.(Şekil 3.6)



Şekil 3.6: Korozyon Ölçümleri İçin Kullanılan Gecor 8 Düzeneği [24]

Düzenek içerisinde bulunan ana kısım üzerindeki tuş ve bağlantı yuvaları Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



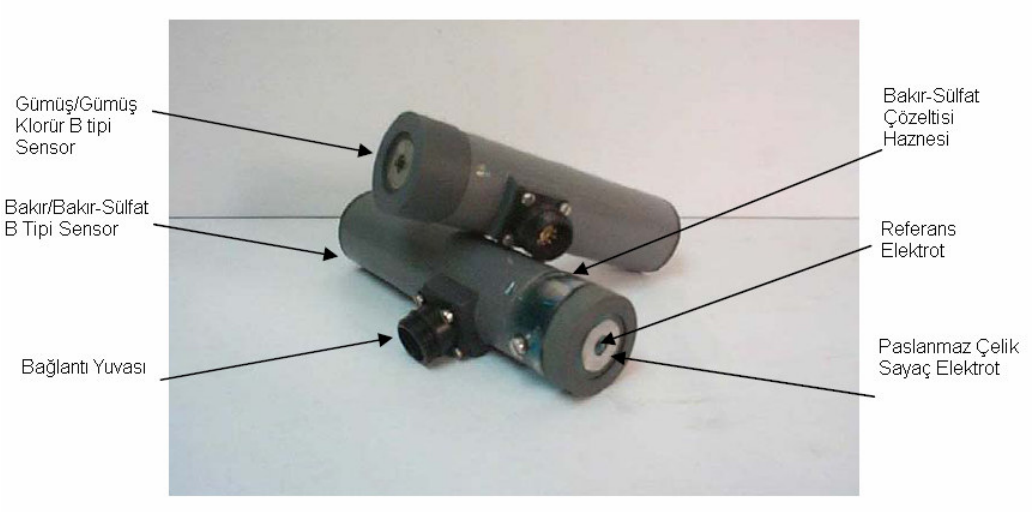
Şekil 3.7: Ölçüm Düzeneğinin Ana Kısmı [24]

Yapılan deneysel çalışmada, ölçüm esnasında, beton yüzeyine yerleştirilen ve ana kısma bir kablo vasıtasıyla bağlı olan 2 ayrı tipte sensor kullanılmıştır. Bu sensorlardan A tipi (Şekil 3.8) disk şekilli olup, üzerinde Bakır/Bakır-Sülfat Merkez Referans elektrotu, sınırlayıcı bakır/Bakır-Sülfat Referans Elektrotlar, paslanmaz çelik sayaç elektrotlar ve her biri 8 ml kapasiteli, Bakır Sülfat çözeltisi ile dolu 3 adet hazne bulunmaktadır. Bu sensor kullanılarak korozyon hızı ve korozyon potansiyeli ölçümleri yapılmaktadır.



Şekil 3.8: A Tipi Sensor (Yarı Hücre) [24]

Diğer sensor ise B tipi sensor olarak adlandırılmakta olup, Bakır/Bakır-Sülfat referans elektrotu, paslanmaz çelik sayaç elektrot ve 12 ml kapasiteli içerisinde Bakır Sülfat bulunan hazneden oluşmaktadır (Şekil 3.9). Bu sensor vasıtasıyla özdirenç ölçümleri yapılmaktadır. Düzenek içerisinde ayrıca her iki sensor için Gümüş/Gümüş Klorür elektrotlardan oluşan tipte sensorlar de bulunmaktadır.



Şekil 3.9: B tipi Sensor (Yarı Hücre)

Lolipop numuneler üzerinde yapılan korozyon ölçümlerinin aşamalarını şu şekilde sıralayabiliriz.

- Öncelikle korozyon hızı ve korozyon potansiyeli ölçümlerini yapmak amacı ile ana kablo korozyon hızı ölçer olarak adlandırılan ana kısma takıldıktan sonra, kablonun kalan bir ucuna A tipi Sensor bağlanır, diğer ucu ise timsah dişler vasıtasıyla donatıya tutturulur.
- Daha sonra A tipi Sensor ıslak bir sünger vasıtası ile betonun yüzeyine yerleştirilir.
- Numuneye ait bilgiler (numune adı, ölçüm yapılacak alan, ölçüm tekniği) ana kısma girildikten sonra, "Go" seçeneği ile ölçüm başlatılır. A tipi sensor ile ölçüm, korozyon seviyesine göre 3 dakika ile 1 dakika arasında değişmektedir.
- Ölçüm sonucunda çıktılar ana kısımda kaydedilir.
- Daha sonra aynı numune üzerinde, özdirenç ölçümü yapabilmek için, B tipi sensor kabloya bağlanır.
- Aynı şekilde ıslak bir sünger vasıtası ile beton yüzeyine yerleştirilir. Diğer uç ise beton donatıya tutturulmuş vaziyettedir.
- Tekrar ölçüm başlatılarak betonun özdirenç ölçümü yapılır. Bu ölçüm ise sensorun bağlantı kurup kurmamasına göre 10 sn ile 20 sn arasında

sürmektedir. Şekil 3.10 ve 3.11'de kullanılan sensorlar vasıtası ile deney esnasında yapılan ölçümlere örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Gecor 8 Aleti (A Tipi Sensor) ile Deney Esnasında Yapılan Korozyon Potansiyeli ve Korozyon Hızı Ölçümü



Şekil 3.11: Gecor Aleti (B tipi Sensor) Deney Esnasında Yapılan Özdirenç Ölçümü

4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Betonların üretim işleminden sonra, yukarıda anlatılan deneyler yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda her deney için tablolar halinde ayrı ayrı verilmiştir.

4.1. Taze Beton Deneyleri Sonuçları

Yapılan çalışma sonucunda, üretilen betonlara ait taze beton deneyleri, betonun üretim aşamasında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Üretim aşamasında, daha önce belirtildiği gibi, istenilen işlenebilme sağlaması amacıyla, kullanılan kimyasal katkı oranları, belirli ölçülerde arttırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Taze Beton Deneyleri Sonuçları ve Kullanılan Kimyasal Katkı Oranları

Karışım No	Taze Beton Birim ağırlığı (g/dm^3)	Çökme (cm)	Akışkanlaştırıcı/ Toplam Bağlayıcı (%)
C1	2,367	18,0	1,2
C2	2,352	13,0	0,4
C3	2,344	18,0	0,0
C4	2,319	18,0	0,4
C5	2,276	18,0	1,1
C6	2,335	14,0	1,3
C7	2,363	18,0	0,4
C8	2,347	17,0	0,0
C9	2,324	18,0	1,7
C10	2,374	18,0	0,4
C11	2,369	18,0	0,0
C12	2,383	16,0	0,55
C13	2,402	16,0	1,2
C14	2,397	15,0	0,4
C15	2,339	16,0	0,0
C16	2,375	18,0	0,4
C17	2,374	18,0	0,4
C18	2,372	17,0	0,4
C19	2,368	18,0	0,4
C20	2,370	18,0	0,4

4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları

4.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Üretilen betonlardan elde edilen küp numuneler, 90 gün boyunca havada ve suda kür edildikten sonra, basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Hava ve su numuneleri için elde edilen sonuçlar Tablo 4.2 ve 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Havada Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanımları

Karışım No	**Basınç Dayanımı (MPa)**			
	1 no'lu numune	2 no'lu numune	3 no'lu numune	Ortalama
C1	47,0	44,9	49,2	47,0
C2	15,8	15,6	16,6	16,0
C3	41,8	41,9	42,6	42,1
C4	32,2	33,9	32,1	32,7
C5	53,4	53,9	50,2	52,5
C6	46,4	48,8	48,4	47,9
C7	49,2	47,9	48,2	48,4
C8	35,1	29,6	29,6	31,4
C9	50,1	51,0	50,3	50,8
C10	55,1	55,8	50,7	53,9
C11	38,1	42,9	39,9	40,3
C12	29,6	30,7	31,1	30,4
C13	42,3	42,6	44,7	43,2
C14	47,3	46,3	46,7	46,8
C15	25,6	26,7	25,3	25,9
C16	48,5	47,6	51,9	49,3
C17	49,5	46,3	47,5	47,8
C18	49,1	47,5	44,7	47,1
C19	47,3	44,4	47,7	46,4
C20	45,6	48,2	44,8	46,2

Tablo 4.3: Suda Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanımları

Karışım No	**Basınç Dayanımı (MPa)**			
	1 no'lu numune	2 no'lu numune	3 no'lu numune	Ortalama
C1	52,2	50,0	50,2	50,8
C2	24,7	24,7	25,2	24,9
C3	52,5	54,6	54,3	53,8
C4	40,3	45,2	43,9	43,2
C5	55,6	58,6	58,0	57,4
C6	57,3	52,0	51,8	53,7
C7	52,3	51,3	50,4	51,3
C8	43,3	41,3	41,8	42,2
C9	52,2	53,3	52,4	52,7
C10	55,6	62,3	62,8	60,2
C11	42,9	48,9	48,9	46,9
C12	-	38,8	41,0	39,9
C13	50,1	52,9	48,1	50,4
C14	52,6	50,5	50,4	51,2
C15	27,4	30,9	30,6	29,6
C16	50,3	49,0	49,5	49,6
C17	51,3	54,9	55,2	53,8
C18	52,7	53,2	50,8	52,2
C19	53,8	50,3	51,3	51,8
C20	54,2	50,4	48,7	51,1

Ayrıca deneylerden elde edilen sonuçlar, Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre değerlendirilerek, betonu oluşturan faktörlerden (değişkenler) dozaj, su/bağlayıcı ve cüruf/bağlayıcı oranlarının değişmesinin beton özelliklerine etkileri incelenmiştir. Söz konusu faktörlerin değiştirilmesi ile beton özelliklerinde meydana gelen değişikler istatiksel olarak incelenmiş, basınç dayanımı, hızlı klor geçirimliliği ve kılcal su emme deneylerinden elde edilen sonuçlarından, hava ve su kürleri için ayrı ayrı fonksiyonlar oluşturulmuştur. Her deneye ait fonksiyonlar ve fonksiyonlara ait katsayılar deney başlıkları altında tablolar halinde verilmiştir. Tablolarda yer alan R^2 değerlerinin büyük olması doğruluğa yaklaşıldığını göstermektedir. Ayrıca tablo üzerinde her değişkene ait F-Değeri olarak adlandırılan bir değer sütunu verilmiştir. Bu değerler değişkenlerin gerçek değerlerinin karelerinin ortalamasının, hata oranlarının karelerinin ortalamasına bölümüyle bulunmuştur. F Değerinin artması doğruluğa yaklaşıldığını göstermektedir. Tabloda yer alan bir diğer sütun ise Olasılık > F Değeri sütunudur. Bu sütunda yer alan değerlerin 0,0500'den küçük olması, o değişkenin kullanılan model için önemli (etkili) olduğunu göstermektedir. Ayrıca her model için istatiksel değerler (ortalama, standart sapma, varyasyon katsayısı) ayrı bir tabloda verilmiştir. Bu denklemler içerisinde yer alan A, B ve C kısaltmaları sırasıyla toplam bağlayıcı oranı (cüruf+çimento), Su / Toplam Bağlayıcı Oranı ve Cüruf / Toplam Bağlayıcı oranını temsil etmektedir.

Basınç deneyi sonuçlarının, Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre değerlendirilmesiyle, belirlenen faktörlerin (değişkenlerin) değişmesiyle basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler incelenmiş ve Denklem 4.1'de yer alan fonksiyon oluşturulmuştur. Fonksiyon da yer alan katsayılar (hava ve su kürleri için), değişkenlere ait F değerleri, Olasılık > F Değerleri ve kullanılan modele ait R^2 değerleri Tablo 4.4 ve 4.5'de verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1 \text{ x } (A) + a_2 \text{ x } (B) + a_3 \text{ x } (C) + a_4 \text{ x } (A)^2 + a_5 \text{ x } (B)^2 + a_6 \text{ x } (C)^2 + a_7 \text{ x } (A \text{ x } B) + a_8 \text{ x } (A \text{ x } C) + a_9 \text{ x } (B \text{ x } C) + a_{10} \text{ x } (A)^3 + a_{11} \text{ x } (B)^3 + a_{12} \text{ x } (C)^3 \quad \textbf{(4.1)}$$

Tablo 4.4: Basınç Dayanımlarına Göre Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları, F – Değerleri ve Olasılık > F Değerleri

R^2 (Hava Kürü) = 0,95 - R^2 (Su Kürü) = 0,97							
Faktör	Katsayılar	Katsayı Değerleri		F-Değeri		Olasılık > F-Değeri	
		Hava	Su	Hava	Su	Hava	Su
Model	-	-	-	56,24	37,69	<u>≤0,0001</u>	<u>≤0,0001</u>
A	a_1	-0,041714	+0,29329	9,34	3,35	<u>0,0085</u>	0,0972
B	a_2	+704,25654	+581,73564	60,49	74,89	<u>≤0,0001</u>	<u>≤0,0001</u>
C	a_3	+37,64076	+159,96978	143,50	150,36	<u>≤0,0001</u>	<u>≤0,0001</u>
$(A)^2$	a_4	-	+0,0002826	-	1,75	-	0,2150
$(B)^2$	a_5	-783,03134	-346,88565	5,76	1,73	<u>0,0309</u>	0,2174
$(C)^2$	a_6	-81,99211	-74,71686	65,07	82,89	<u>≤0,0001</u>	<u>≤0,0001</u>
(A x B)	a_7	-	-0,80611	-	6,41	-	<u>0,0297</u>
(A x C)	a_8	-	-0,20696	-	13,57	-	<u>0,0042</u>
(B x C)	a_9	-	-95,96950	-	2,36	-	0,1552
$(A)^3$	a_{10}	-	-	-	-	-	-
$(B)^3$	a_{11}	-	-	-	-	-	-
$(C)^3$	a_{12}	-	-	-	-	-	-
Sabit	a_0	-93,46577	-149,60447	-	-	-	-

* Altı Çizili Olasılık > F Değerleri Etkin (Önemli) Faktörlerdir.

Tablo 4.5: Basınç Dayanımları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatiksel Değerleri

Kür Türü	r^2	Ortalama	σ	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,9526	42,31	2,52	5,96
Suda	0,9714	48,32	2,03	4,19

Tablo 4.4'de yer alan A harfi Toplam Bağlayıcı (Cüruf+Çimento), B harfi Su/Toplam Bağlayıcı ve C harfi ise Cüruf/Toplam Bağlayıcı anlamına gelmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi Olasılık > F – Değerinin 0,0500'den küçük olması o faktörün model içerisinde etkin (önemli) bir rol aldığını göstermektedir. Etkin faktörlerin Olasılık > F-Değerlerinin altı çizilmiştir. Hava kürleri için A, B, C, B^2 ve

C^2 faktörleri, bu model için etkin faktörlerdir. Su kürleri için ise B, C, C^2, AB ve AC faktörleri bu model için etkin faktörlerdir.

4.2.1.1. Hava Kürü Uygulanmış Betonlar

Yapılan istatiksel değerlemeler sonucunda, hava kürleri için faktörlerin değişmesi ile basınç dayanımında meydana gelen değişimler Ek C'de (Şekil C.1-C.2-C.3-C.4-C.5-C.6-C.7-C.8-C.9) gösterilmiştir.

Ek C, Şekil C.4, C.5 ve C.6'da yer alan grafiklere bakıldığında Cüruf/Bağlayıcı oranı değiştirilmesi ile Toplam Bağlayıcı (Cüruf+Çimento), Su/Bağlayıcı ve Dayanım arasındaki ilişki gösterilmektedir. Beklenildiği üzere su/bağlayıcı oranı arttığında, betondaki boşluk oranı artacağından dayanım azalmaktadır. Aynı zamanda toplam bağlayıcı arttıkça, dayanımda azalmalar meydana gelmektedir. Agrega dayanımının, matris dayanımına göre daha fazla olması ve toplam bağlayıcı arttıkça agrega hacminin azalmasından dolayı böyle bir sonuçla karşılaşılmıştır. Diğer şekillerde görüldüğü gibi toplam bağlayıcı ve Su/Bağlayıcı oranları değiştikçe aynı sonuçlar elde edilmektedir. Grafiklerden çıkan bir başka sonuç ise Cüruf/Bağlayıcı oranı arttıkça dayanımlarda meydana gelen azalmadır. Bunun sebebi ise cürufun 2 aşamalı hidratasyonudur. Hava kürü uygulanmış numunelerde, cüruf miktarı arttığında, çimento miktarı ve buna bağlı olarak çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan $Ca(OH)_2$ miktarı azalacaktır. $Ca(OH)_2$'nin azalması ile cüruflu betonların dayanım kazanmasında önemli rolü olan, cüruf ile $Ca(OH)_2$ arasındaki reaksiyonlar da azalacaktır.

4.2.1.2. Su Kürü Uygulanmış Betonlar

Ek D (Şekil D.1-D.2-D.3-D.4-D.5-D.6-D.7-D.8-D.9)'de su kürleri için, faktörlerin değişmesi ile dayanımda meydana gelen değişimler gösterilmiştir.

Su kürlerine ait grafikler incelendiğinde, hava kürlerinde olduğu gibi cüruf oranı arttıkça dayanımın düştüğü gözlenmiştir. Ancak su kürlerine ait dayanım değerlerinin, hava kürlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan kür koşullarının beton dayanımını etkilediği sonucu çıkarılmaktadır. Bunun sebebi ortamda yeterli su bulunması durumunda, cürufun su ile arasında oluşan reaksiyonlar sonucunda, C-S-H jellerinin oluşmasıdır. Bunun yanında cüruf oranı 0,17 olduğunda; toplam bağlayıcı arttıkça, dayanım artmakta, cüruf oranı 0,68 olduğunda; toplam

bağlayıcı arttıkça, dayanım azalmaktadır. Toplam Bağlayıcı değişimi ile dayanımda meydana gelen değişimler, cüruf miktarına bağlıdır. Cüruf belirli bir orana kadar, matris dayanımına olumlu etki ederek, beton dayanımının artmasına sebep olmaktadır. Belirli bir noktadan sonra ise çimento miktarı ve buna bağlı olarak hidratasyon ürünü $Ca(OH)_2$ miktarı azalacağından, cüruf hidratasyonunu tam anlamıyla gerçekleşemeyecek ve matris dayanımı azalacaktır. Yüksek dozajlarda, su/toplam bağlayıcı oranının değişimi, düşük dozajlara göre daha fazla olmaktadır. Çünkü dozajın fazla olduğu durumlarda (400 dozaj) suyun artışı ile matriste meydana gelen boşluklar daha fazla oluşacak ve böylelikle dayanım daha fazla azalacaktır.

4.2.2. Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları

ASTM C 1202-97 standardında belirtilen yöntem uygulanarak, her betonun hava ve su kürlerine ait 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde silindir numunelerden kesilerek hazırlanan 5 cm'lik 3'er adet disk numune üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçların ortalama değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Hızlı Klorür Geçirimliliği deneyi sonuçlarının, Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre değerlendirilmesiyle, belirlenen faktörlerin (değişkenlerin) değişmesiyle toplam tük (coloumb) değerlerinde meydana gelen değişimler incelenmiş ve Denklem 4.2'de yer alan fonksiyon oluşturulmuştur. Fonksiyon da yer alan katsayılar (hava ve su kürleri için), değişkenlere ait F değerleri, Olasılık > F Değerleri ve modele göre bulunmuş istatiksel değerler Tablo 4.7 ve 4.8'de verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1 \text{ x } (A) + a_2 \text{ x } (B) + a_3 \text{ x } (C) + a_4 \text{ x } (A)^2 + a_5 \text{ x } (B)^2 + a_6 \text{ x } (C)^2 + a_7 \text{ x } (A \text{ x } B) + a_8 \text{ x } (A \text{ x } C) + a_9 \text{ x } (B \text{ x } C) + a_{10} \text{ x } (A)^3 + a_{11} \text{ x } (B)^3 + a_{12} \text{ x } (C)^3 \quad \textbf{(4.2)}$$

Tablo 4.6: Hızlı Klorür Geçirimliliği Sonuçları Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatiksel Değerleri

Kür Türü	r^2	Ortalama	σ	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,8864	3754,53	1218,65	32,46
Suda	0,9121	750,67	249,94	33,30

Tablo 4.7: Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları

Karışım No	Hızlı Klorür Geçirimliliği (Coloumb)	
	HAVA	**SU**
C1	4658,4	1128,6
C2	8921,7	979,7
C3	4174,7	527,4
C4	2309,9	241,2
C5	831,2	274,1
C6	1594,8	272,7
C7	1238,4	382,5
C8	8875,8	621,5
C9	2174,4	754,2
C10	5430,2	1410,8
C11	9487,8	1396,8
C12	2819,3	387,5
C13	1005,3	151,2
C14	8483	3366
C15	6623,6	1046,3
C16	1400,4	427,5
C17	1204,2	439,2
C18	1425,6	434,7
C19	1208,7	387
C20	1223,6	384,8

Tablo 4.8: Hızlı Klor Geçirimliliği Sonuçlarına Göre Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları, F –Değerleri ve Olasılık > F Değerleri

R^2 (Hava Kürü) = 0,89 - R^2 (Su Kürü) = 0,91							
Faktör	Katsayılar	Katsayı Değerleri		F-Değeri		Olasılık > F-Değeri	
		Hava	Su	Hava	Su	Hava	Su
Model	-	-	-	21,86	29,06	<u>≤0,0001</u>	<u>≤0,0001</u>
A	a_1	+25,67615	+3,07817	15,16	5,18	<u>0,0016</u>	<u>0,0391</u>
B	a_2	-442630	+18536,95231	33,84	4,62	<u>≤0,0001</u>	<u>0,0495</u>
C	a_3	-32391,62834	-9561,68291	3,36	55,44	0,0882	<u>≤0,0001</u>
$(A)^2$	a_4	-	-	-	-	-	-
$(B)^2$	a_5	+462153	-14576,52947	8,58	0,20	<u>0,0110</u>	0,6592
$(C)^2$	a_6	+35319,09198	+8925,62312	51,69	78,48	<u>≤0,0001</u>	<u>≤0,0001</u>
(A x B)	a_7	-	-	-	-	-	-
(A x C)	a_8	-	-	-	-	-	-
(B x C)	a_9	-	-	-	-	-	-
$(A)^3$	a_{10}	-	-	-	-	-	-
$(B)^3$	a_{11}	-	-	-	-	-	-
$(C)^3$	a_{12}	-	-	-	-	-	-
Sabit	a_0	+104947	-3965,56813	-	-	-	-

* Altı Çizili Olasılık > F Değerleri Etkin (Önemli) Faktörlerdir.

Tablo 4.7'de yer alan A harfi Toplam Bağlayıcı (Cüruf+Çimento), B harfi Su/Toplam Bağlayıcı ve C harfi ise Cüruf/Toplam Bağlayıcı anlamına gelmektedir. Olasılık > F – Değerinin 0,0500'den küçük olması o faktörün model içerisinde etkin (önemli) bir rol aldığını göstermektedir. Etkin faktörlerin Olasılık > F-Değerlerinin altı çizilmiştir. Hava kürleri için A, B, B^2 ve C^2 faktörleri, bu model için etkin faktörlerdir. Su kürleri için ise A, B, C ve C^2 faktörleri bu model için etkin faktörlerdir.

4.2.2.1. Hava Kürü Uygulanmış Betonlar

Yapılan istatiksel değerlemeler sonucunda, hava kürleri için faktörlerin değişmesi ile toplam geçen elektriksel yük (coloumb) sonuçlarında meydana gelen değişimler Ek C'de gösterilmiştir.

Hızlı Klorür geçirimliliği deney sonuçlarından elde edilen toplam geçen elektriksel yük (coloumb) değerlerinin büyük olması, söz konusu betonun elektriksel direncinin az olduğunun göstergesidir. Ek C'de (Şekil C.10-C.11-C.12-C.13-C.14-C.15-C.16-C.17-C.18) verilen hava kürleri grafiklerine bakıldığında, betonda su miktarı arttıkça, boşluk oranı artacağından, betonun elektriksel direnci azalmaktadır. Yine betonda toplam bağlayıcı oranı arttığı zaman, betonda matris hacminin artması ve agrega hacminin azalması sonucunda, elektriksel direnç azalmaktadır. Hava kürlerine bakıldığında su/bağlayıcı oranı ve toplam bağlayıcı oranı sabit tutulan bir betonda, cüruf oranı arttıkça, belirli bir cüruf değerine kadar betonun elektriksel direnci artmakta, bu noktadan sonra ise tekrar azalmaya başlamaktadır. Bu dönüm noktası grafiklerde görüldüğü gibi yaklaşık cüruf/toplam bağlayıcı oranının 0,40'a eşit olduğu bir bölgede bulunmaktadır. Dönüm noktasından sonra cüruf/toplam bağlayıcı oranının artmasıyla betonun elektriksel direnci azalsa bile, dönüm noktasından önceki cüruf oranlarında (cüruf miktarının 0,40'dan daha az olması) elde edilen elektriksel dirence göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

4.2.2.2. Su Kürü Uygulanmış Betonlar

Yapılan istatiksel değerlemeler sonucunda, su kürleri için faktörlerin değişmesi ile Toplam Geçen Elektriksel Yük (coloumb) sonuçlarında meydana gelen değişimler Ek D (Şekil D.10-D.11-D.12-D.13-D.14-D.15-D.16-D.17-D.18)'de gösterilmiştir.

Su kürlerine ait grafikler incelendiğinde, betonların elektriksel dirençlerinin, hava kürlerindeki betonlara göre daha yüksek olduğu (geçen toplam yük daha az) görülmektedir. Su kürlerinde de hava kürlerinde olduğu gibi toplam bağlayıcı ve su miktarı arttıkça betonun elektriksel direnci azalmaktadır. Ancak bu azalma hava kürlerinde olduğu gibi çok yüksek değerlerde olmamaktadır. Cüruf miktarı ile elektriksel direnç arasındaki ilişki, hava kürü betonlarıyla benzer özellikler göstermektedir. Aradaki fark ise dönüm noktasının cüruf miktarının yaklaşık 0,55 olduğu bölgede olmasıdır. Ayrıca dönüm noktasından sonraki bölge ile dönüm noktasından önceki bölge arasındaki elektriksel direnç farkı, hava kürlerine oranla daha büyük olmaktadır. (0,68 cüruf oranlı beton ile 0,17 cüruf oranlı beton arasındaki elektriksel direnç farkı büyümüştür.)

4.2.3. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Önceden hazırlanan prizma numuneler belirli boyutlarda kesilerek kılcallık deneyine tabi tutulmuş ve bu deneyden elde edilen kılcallık katsayısı (k) ve etkin porozite katsayısı (ε_e) hesaplanmıştır. Tablo 4.9'da hesaplanan sonuçlar verilmiştir.

Hızlı Klorür Geçirimliliği deneyi sonuçlarının, Merkezi Karma Tasarım Yöntemine göre değerlendirilmesiyle, belirlenen faktörlerin (değişkenlerin) değişmesiyle kılcallık katsayısı değerlerinde meydana gelen değişimler incelenmiş ve Denklem 4.3'de yer alan fonksiyon oluşturulmuştur. Fonksiyon da yer alan katsayılar (hava ve su kürleri için), değişkenlere ait F değerleri, Olasılık > F Değerleri ve modele göre bulunmuş istatiksel değerler Tablo 4.10 ve 4.11'de verilmiştir.

$$Y = a_0 + a_1 \text{ x } (A) + a_2 \text{ x } (B) + a_3 \text{ x } (C) + a_4 \text{ x } (A)^2 + a_5 \text{ x } (B)^2 + a_6 \text{ x } (C)^2 + a_7 \text{ x } (A \text{ x } B) + a_8 \text{ x } (A \text{ x } C) + a_9 \text{ x } (B \text{ x } C) + a_{10} \text{ x } (A)^3 + a_{11} \text{ x } (B)^3 + a_{12} \text{ x } (C)^3 \quad \textbf{(4.3)}$$

Tablo 4.9: Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Karışım No	Kılcallık Katsayısı (k) ($kg/m^2.\sqrt{sn}$)		Etkin Porozite (ε_e) (kg/dm^3)	
	Hava Kürü	Su Kürü	Hava Kürü	Su Kürü
C1	0,0175	0,0106	0,062	0,044
C2	0,0706	0,0201	0,152	0,098
C3	0,0374	0,0081	0,146	0,018
C4	0,0377	0,0099	0,039	0,013
C5	0,0088	0,0049	0,020	0,008
C6	0,0106	0,0044	0,023	0,007
C7	0,0253	0,0073	0,072	0,009
C8	0,0786	0,0153	0,159	0,019
C9	0,0091	0,0047	0,016	0,007
C10	0,0196	0,0124	0,045	0,020
C11	0,0350	0,0164	0,086	0,021
C12	0,0348	0,0059	0,112	0,008
C13	0,0147	0,0035	0,044	0,005
C14	0,0160	0,0081	0,040	0,018
C15	0,0660	0,0146	0,155	0,023
C16	0,0273	0,0067	0,055	0,009
C17	0,0239	0,0067	0,053	0,009
C18	0,0240	0,0061	0,050	0,008
C19	0,0288	0,0076	0,074	0,006
C20	0,0276	0,0072	0,068	0,008

Tablo 4.10: Kılcallık Katsayısı Kullanılarak Oluşturulan Fonksiyonların İstatiksel Değerleri

Kür Türü	r^2	Ortalama	σ	Varyasyon Katsayısı
Havada	0,8112	0,031	0,010	34,11
Suda	0,9843	9,025E-03	7,816E-04	8,66

Tablo 4.11: Kılcallık Katsayılarına (k) Göre Oluşturulan Fonksiyonların Katsayıları, F –Değerleri ve Olasılık > F Değerleri

R^2 (Hava Kürü) = 0,81 - R^2 (Su Kürü) = 0,98							
Faktör	Katsayılar	Katsayı Değerleri		F-Değeri		Olasılık > F-Değeri	
		Hava	Su	Hava	Su	Hava	Su
Model	-	-	-	9,31	69,63	0,0004	<0,0001
A	a_1	+1,00615E-03	-3,77824E-03	10,86	112,96	0,0058	<0,0001
B	a_2	+0,19398	+4,31876	24,04	11,85	0,0003	0,0063
C	a_3	-0,18375	+0,039687	17,99	71,58	0,0010	<0,0001
$(A)^2$	a_4	-1,32624E-06	+1,12235E-05	1,48	3,18	0,2461	0,1049
$(B)^2$	a_5	-	-8,64951	-	23,31	-	0,0007
$(C)^2$	a_6	-	-0,16662	-	136,80	-	<0,0001
(A x B)	a_7	-	-	-	-	-	-
(A x C)	a_8	+2,55882E-06	-	0,78	-	0,3936	-
(B x C)	a_9	+0,26906	-	0,70	-	0,4188	-
$(A)^3$	a_{10}	-	-1,08289E-08	-	33,22	-	0,0002
$(B)^3$	a_{11}	-	+5,80342	-	5,07	-	0,0480
$(C)^3$	a_{12}	-	+0,15973	-	127,20	-	<0,0001
Sabit	a_0	-0,27861	-0,30338	-	-	-	-

* Altı Çizili Olasılık > F Değerleri Etkin (Önemli) Faktörlerdir.

Tablo 4.10'da yer alan A harfi Dozaj (Toplam Bağlayıcı), B harfi Su/Toplam Bağlayıcı ve C harfi ise Cüruf/Toplam Bağlayıcı anlamına gelmektedir. Olasılık > F – Değerinin 0,0500'den küçük olması o faktörün model içerisinde etkin (önemli) bir rol aldığını göstermektedir. Etkin faktörlerin Olasılık > F-Değerlerinin altı çizilmiştir. Hava kürleri için A, B ve C faktörleri, bu model için etkin faktörlerdir. Su kürleri için ise A, B, C, B^2, C^2, A^3, B^3 ve C^3 faktörleri bu model için etkin faktörlerdir.

4.2.3.1. Hava Kürü Uygulanmış Betonlar

Yapılan istatiksel değerlemeler sonucunda, hava kürleri için faktörlerin değişmesi ile kılcallık katsayılarında meydana gelen değişimler Ek C (Şekil C.19-C.20-C.21-C.22-C.23-C.24-C.25-C.26-C.27)'de gösterilmiştir.

Hava kürlerinden elde edilen grafikler incelendiğinde, diğer deneylerde olduğu gibi, su/toplam bağlayıcı ve toplam bağlayıcı dozajı arttıkça, kılcallık katsayılarında da bir artış olmaktadır. Bu oranların artması betonun daha geçirimli bir hal almasını

sağlamaktadır. Sebebi ise hava ortamında, çimento hidratasyonu sırasında açığa çıkan $Ca(OH)_2$ miktarının azalması ve ortamda su miktarının sınırlı olmasıdır. Ortamda sınırlı su bulunması ile çimento hidratasyonu sonucu $Ca(OH)_2$ miktarı azalacak ve böylelikle cürufun hidratasyonu için gerekli ana etmen sınırlanmış olacaktır. Bunun yanında cürufun da bağlayıcılık özelliğinden kaynaklanan hidratasyonu, ortamda yeterli su olmadığından gerçekleşmeyecektir. Sonuç olarak beton matrisi daha boşluklu bir hal alacaktır. Grafiklerden çıkan bir diğer sonuç ise cüruf/toplam bağlayıcı oranın artması ile, kılcallık katsayılarında meydana gelen artıştır. Bunun sebebi de yukarıda anlatıldığı gibi ortamdaki su miktarının sınırlanması ile cürufun etkinliğini gösterememesidir. Cüruf oranı arttıkça çimento oranı azalacağından ve cürufun bağlayıcılık özelliği etkin olmadığından matris daha boşluklu bir hal alacaktır.

4.2.3.2. Su Kürü Uygulanmış Betonlar

Yapılan istatiksel değerlemeler sonucunda, su kürleri için faktörlerin değişmesi ile kılcallık katsayılarında meydana gelen değişimler Ek D (Şekil D.19-D.20-D.21-D.22-D.23-D.24-D.25-D.26-D.27)'de gösterilmiştir.

Su kürü numunelerinden elde edilen grafiklere ait kılcallık katsayısı değerlerinin, hava kürü numunelerine ait değerlere oranla daha küçük olduğu (daha geçirimsiz) görülmektedir. Durum kür koşulunun önemli olduğunun bir göstergesidir. Toplam Bağlayıcı ve su/toplam bağlayıcı oranlarının artması ile meydana gelen değişimlerin karakteristikleri hava kürü numuneleriyle benzerlikler göstermektedir. Grafiklerdeki önemli fark ise cüruf/toplam bağlayıcı oranın değişmesi ile oluşan davranıştır. Bu davranış hızlı klor geçirimliliği deney sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Cüruf oranın belirli bir dönüm noktasına kadar artmasıyla, bir noktaya kadar kılcallık katsayılarında azalma (daha geçirimsiz beton), bu noktadan sonra ise kılcallık katsayılarında bir artma olmaktadır. Bu dönün noktasın cüruf oranın yaklaşık 0,55 olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Dönüm noktasından sonra cüruf/toplam bağlayıcı oranının artmasıyla betonun elektriksel direnci azalsa bile, dönüm noktasından önceki cüruf oranlarında (cüruf miktarının 0,55'dan daha az olması) elde edilen elektriksel dirence göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

4.2.4. Lineer Polarizasyon (Korozyon Hızı), Korozyon Potansiyeli (Yarı Hücre Potansiyeli) ve Özdirenç (Resistivite) Deney Sonuçları

90 gün boyunca suda ve havada kür uygulanan numunelerin, kür sürelerini tamamladıktan sonra, Gecor 8 aleti kullanılarak, korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve özdirenç ölçümleri, eşzamanlı olarak alınmaya başlanmıştır. Ölçüm süresi boyunca, ölçüm yapılan her numune, 1 molar klorür içeren suda 1 hafta boyunca bekletildikten sonra, sudan çıkarılarak 1 hafta da havada kuruması için bekletilmiş ve daha sonra ölçüm tekrar yapılmıştır. Gecor 8 aletinin disk şekilli sensoru vasıtasıyla korozyon potansiyeli ve korozyon hızı değerleri, silindir sensoru vasıtasıyla ise özdirenç ölçümleri aynı anda ölçülmüştür. Bu döngü her ölçümden sonra tekrarlanmıştır. Ölçümlerin başlangıcından, tez çalışmasının hazırlanmasına kadar geçen süre zarfında alınan korozyon hızı (lineer polarizasyon), korozyon potansiyeli ve özdirenç ölçümlerinin zamana göre değişimlerini gösteren grafikler Ek-A ve Ek-B'de verilmiştir. Korozyon hızı grafiklerinde düşey eksen ölçülen değerler (logaritmik), yatay eksen ise zamanı (gün) göstermektedir. Diğer grafiklerde ise logaritmik eksen takımı kullanılmamıştır.

Aynı betona ait havada ve suda kür edilmiş numunelerin grafiklerinde görüldüğü üzere, hava numunelerinde elde edilen korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve özdirenç ölçümleri, su numunelerine göre daha kötü sonuçlar vermiştir. Bu durum kür koşullarının korozyon açısından önemli olduğunun göstergesidir.

En son yapılan ölçümlere kadar geçen sürede hava numunelerinde C2, C8, C11, C12, C13 ve C15 nolu numuneler ile su numunelerinden C2 nolu betonlara ait grafikler yüksek korozyon hızı değerlerine (>0,1 $\mu a/cm^2$), yüksek korozyon potansiyeli değerlerine (<-350 mV) ve C2 betonu dışında diğerleri düşük özdirenç değerlerine (<10 kΩ.cm) ulaşmışlardır. Bu betonlar içerisinde C2 betonu, cüruf/toplam bağlayıcı oranın maksimum olduğu (0,85), C8 betonu, su/toplam bağlayıcı oranın maksimum olduğu (0,60) betonlardır. C2 betonunda kullanılan yüksek oranda cüruf betonun özdirencini arttırmıştır. Ayrıca su oranın yüksek olması geçirimliliğin yüksek olmasına ve buna bağlı olarak korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve özdirenç ölçümlerinde daha düşük sonuçlar elde edilmesine sebep olmuştur.

4.2.5. Optimizasyon

Yapılan çalışmalar neticesinde deneylerden elde edilen veriler dikkate alınarak, en iyi özelliklere sahip beton karışımını belirleyebilmek için optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyon işleminde basınç dayanımı maksimum, kılcal su emme, hızlı klorür geçirimliliği ve maliyeti minimum olan betonu elde etmek amaçlanmıştır. Buna ek olarak piyasa araştırması neticesinde, betona giren malzemelerin birim fiyatları belirlenmiş, kalitesi yüksek ve maliyeti düşük beton karışımı elde edebilmek amacıyla ikinci optimizasyon yapılmıştır. Yapılan piyasa araştırmasında betona giren malzemelerin kg fiyatları arasında yapılan oranlama sonucunda elde edilen birim fiyatları tablo 4.12'de verilmiştir. Maliyetli ve maliyetsiz yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen en iyi karışım değerleri ve bu değerler sonucunda elde edilen dayanım, kılcal su emme, hızlı klor geçirimliliği vb. sonuçlar tablo 4.13 ve 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.12: Betona giren Malzemelerin Birim Fiyatları

MALZEMELER	BİRİM
Çimento	10
Cüruf	5
Su	0,33
Kırmataş II	1
Kırmataş I	1
Kırma Kum	1
Doğal Kum	1,67
Kimyasal Katkı	701,67

* Tablo 4.12'de yer alan 1 birim 0,012 YTL/kg'a karşılık gelmektedir.

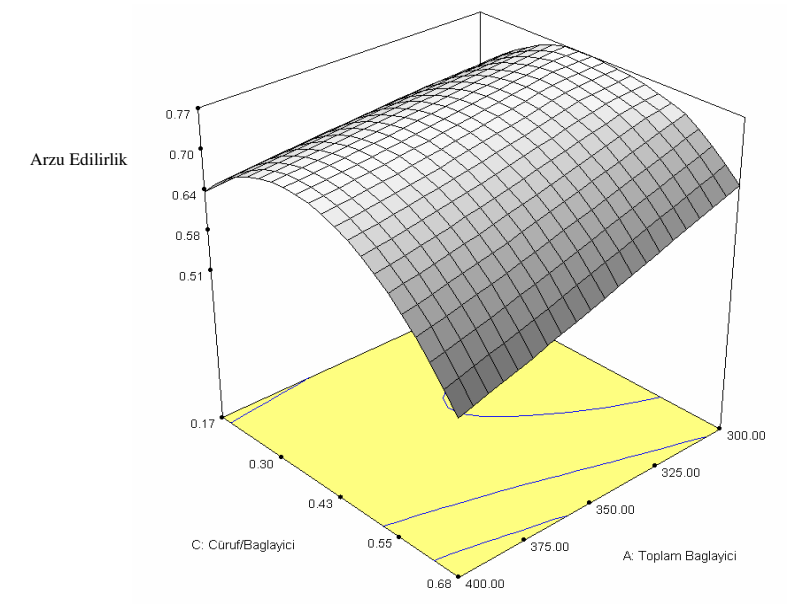
Tablo 4.13 : Yapılan Maliyetsiz Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler

Malzemeler	Kür Koşulu	
	Hava Kürü	Su Kürü
Toplam Bağlayıcı (kg/m^3)	300,18	300,00
Cüruf/Toplam bağlayıcı	0,26	0,38
Su/Toplam Bağlayıcı	0,49	0,48
Basınç Dayanımı (MPa)	55,57	55,95
Klorür Geçirimliliği (coulomb)	659,162	151,18
Kılcallık Katsayısı ($\frac{kg}{m^2 \times \sqrt{sn}}$)	0,0044	0,0026
Arzu Edilirlik (D)	1,000	0,958

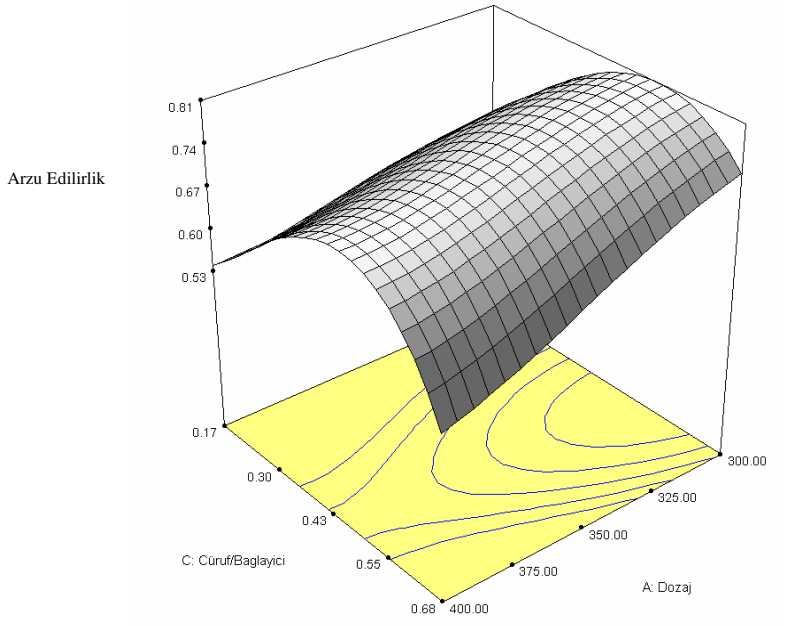
Tablo 4.14 : Yapılan Maliyetli Optimizasyon Sonucunda Elde Edilen Değerler

Malzemeler	Kür Koşulu	
	Hava Kürü	Su Kürü
Toplam Bağlayıcı (kg/m^3)	354,20	300,00
Cüruf/Toplam bağlayıcı	0,40	0,51
Su/Bağlayıcı	0,49	0,55
Basınç Dayanımı (MPa)	50,56	49,29
Klorür Geçirimliliği (coulomb)	831,09	194,49
Kılcallık Katsayısı ($\frac{kg}{m^2 \times \sqrt{sn}}$)	0,0228	0,0035
Maliyet (birim)	268,77	245,47
Arzu Edilirlik (D)	0,772	0,810

Hava kürüne tabi tutulmuş betonun dayanımının maksimum, geçirimlilik ve maliyetin minimum yapılması halinde arzu edilirliğin (D), cüruf ve toplam bağlayıcı miktarıyla değişimini gösteren tepki yüzeyleri Şekil 4.1'de, su kürüne ait değerler kullanılarak oluşturulan tepki yüzeyleri ise şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Hava Kürlerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimlilik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edilirliğin (D) Cüruf /Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi



Şekil 4.2: Su Kürlerinde Dayanımının Maksimum, Geçirimlilik ve Maliyetin Minimum Yapılması Halinde Arzu Edilirliğin (D) Cüruf /Toplam Bağlayıcı ve Toplam Bağlayıcı Miktarıyla Değişimini Gösteren Tepki Yüzeyi

5. GENEL SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, beton içerisinde farklı oranlarda kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun, betonun durabilite özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda farklı cüruf oranlarında üretilen 20 adet beton üzerinde basınç dayanımı, hızlı klorür geçirimliliği, kılcal su emme deneyleri yapılmış, aynı betonlara ait özel numuneler üzerinde, belirli periyotlarda, eş zamanlı olarak korozyon hızı (lineer polarizasyon), korozyon potansiyeli (yarı hücre potansiyeli) ve özdirenç ölçümleri yapılmıştır. Yapılan tüm çalışma sonunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Basınç Dayanımı sonuçlarına göre su kürlerine ait dayanım değerleri, hava kürlerine ait dayanım değerlerinden daha yüksek sonuçlar vermiştir. Kür koşulları değiştiğinde (ortamda su bulunduğunda) cüruf daha etkin hale gelmektedir.
- Su ve hava kürleri için su/toplam bağlayıcı oranı arttıkça, beton matrisinde boşluk miktarı arttığından, beton dayanımında azalmalar meydana gelmektedir. Hava kürlerinde, dozaj arttıkça dayanımda azalmalar meydana gelmektedir. Basınç dayanımı açısından, hava kürleri için agrega dayanımının, matris dayanımına göre daha etkin bir rol aldığı görülmektedir. Su kürleri için ise cüruf oranına göre 2 farklı durum söz konusudur. Cüruf oranı belirli bir noktaya kadar dozaj arttıkça, dayanım artmakta, bu noktadan sonra dozaj arttıkça dayanım azalmaktadır. Bu durum matrisin betonun dayanımına olan etkisinin cüruf oranına göre değişmesinden kaynaklanmaktadır.
- Her iki kür koşulu kendi arasında incelendiğinde cüruf/toplam bağlayıcı oranı arttıkça beton basınç dayanımı azalmaktadır. Su kürleri açısından düşük dozajlarda (300 dozaj) cüruf oranının yaklaşık 0,30'lara kadar çıkması ile olumlu bir etki görülmekte, bu değerden sonra dayanımda azalmalar oluşmaktadır.
- Hızlı klorür geçirimliliği deneyi sonuçlarına göre hava kürlerine ait geçen toplam yük miktarı, su kürlerine oranla daha düşüktür. Kür koşularının etkisi elektriksel direnci de etkilemektedir.

- Hava ve su kürlerine ait grafiklerde görüldüğü gibi dozaj miktarı ve su/toplam bağlayıcı oranı arttığında, betonların elektriksel dirençleri azalmaktadır. Su miktarının artması ile matriste boşluk miktarının çoğalması sonucu ve dozaj miktarının artmasıyla matris hacminin artması sonucunda bu etkiler görülmektedir.

- Her iki kür koşulunda da cüruf/toplam bağlayıcı oranın artması ile birbirine benzer bir davranış gözlenmektedir. Cüruf oranı belirli bir noktaya kadar betonun elektriksel direncine olumlu etki yapmakta, bu noktadan sonra ise etkisini kaybederek betonun elektriksel direncini azaltmaktadır. Hava kürlerinde bu oran yaklaşık 0,40, su kürlerinde ise bu oran 0,55 bölgelerinde yer almaktadır. Ayrıca hava kürlerinde 0,17 cüruf oranı ile 0,68 cüruf oranı arasındaki elektriksel direnç farkı su kürlerine göre daha azdır. Ayrıca hem hava kürü hem de su kürleri için 0,17 cüruf oranlı betonların elektriksel direnci, 0,68 cüruf oranlı betonlara göre daha düşük sonuçlar vermektedir. Bu durum ortamda su bulunması durumunda cürufun 2 aşamalı hidratasyonunun tam anlamı ile gerçekleşmesi sonucunda meydana gelmektedir. Ayrıca cüruf oranın belirli bir düzeye kadar artması sonucu betonun elektriksel direnci artmaktadır.

- Kılcal su geçirimliliği sonuçlarına bakıldığında, hava ve su kürleri için, su/toplam bağlayıcı oranı ve/veya dozaj arttıkça kılcallık katsayılarında meydana gelen artıştır. Bu durum betonun su geçirimliliğinin artığının bir göstergesidir.

- Hava kürü numunelerinde cüruf/toplam bağlayıcı oranın artmasıyla kılcallık katsayılarında sürekli bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum ortamda yeterli su bulunmadığından dolayı cürufun hidratasyonunu tamamlayamamasından kaynaklanmaktadır. Su kürleri için ise bu durum elektriksel direnç sonuçlarında olduğu gibi, belirli bir cüruf oranına kadar kılcallık katsayısı azalmakta, bu noktadan sonra ise kılcallık katsayısı azalmaya başlamaktadır. Bu dönüm noktası cüruf oranının 0,55 olduğu bölgelere denk düşmektedir. Ayrıca 0,17 oranın cüruf kullanıldığında elde edilen

geçirimlilik katsayısı, 0,68 oranında cüruf kullanıldığında elde edilen geçirimlilik katsayısına göre daha yüksektir.

- Özdirenç ölçümleri sonuçlarına bakıldığında hava kürlerine ait betonlarda cüruf oranının 0 olduğu (C14), su miktarının maksimum olduğu (C8) betonlar başta olmak üzere, çoğu betonun özdirenç değerlerinin düşük seyrettiği görülmektedir. Aynı betonların su kürlerine bakıldığında ise sınır değerinin altına düşen beton görülmemektedir. Betonda cüruf oranı arttıkça özdirenç değerleri yükselmektedir.
- Korozyon hızı ölçümlerine bakıldığında su oranı ve/veya cüruf oranı yüksek olan betonların korozyon hızı sonuçları ölçüm süresince sınır değerlerinin üzerine çıkmıştır. Fakat aynı betonların su kürü numuneleriyle yapılan ölçümlerde daha küçük değerler elde edilmiş ve yalnızca cüruf oranı maksimum olan (0,85) C2 betonu haricinde sınır değerler üzerine çıkan numune gözlenmemiştir.
- Korozyon potansiyeli ölçümlerinde ise hava kürlerinde korozyon hızı ölçümlerine benzer olarak cüruf oranı ve/veya su oranı yüksek olan betonların potansiyel değerleri daha yüksek çıkmıştır. (negatif olarak) Su kürlerinde ise cüruf oranı yüksek, su oranı düşük olan betonlarda iyileşme görülürken, su oranı yüksek olan betonların değerleri yine yüksek değerlere ulaşmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **Erdoğan, T.Y.,** Mayıs 2003, Beton, O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası, Ankara.

[2] **Illstom, J.M. and Domone, P.L.J.,** 2001. Construction Materials their nature and behaviour , Spon Pres, USA and Canada

[3] **Onaran, K.**, 2003. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul

[4] **Postacıoğlu, B.**, 1986. Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 1, Bağlayıcı Maddeler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul

[5] **Ersoy, U.,** 1985., Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, 3. Basım, Evrim Yayınevi, İstanbul

[6] **Fagerlund, G.,** 1982. On the capillarity of concrete. Nordic Concrete Research, Nordic Concrete Federation. Publication No 1,

[7] **Carino, N.C.,** 1999. Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structure, Journel of Performance of Constructed Facilities, **August,** 96-106

[8] **Kyong, Y.Y. and Eun, K.K.,** 2004. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag, Cement and Concrete Research

[9] **Faguang, L. and Naiqian, F. and Xinying, L.,** 2000. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, Cement and Concrete Research, **30**, 989-992

[10] **Della, M.R. and Weimin, J. and Silsbee, M.R.,** 2000. Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties, Cement and Concrete Research, **30**, 1879-1884

[11] **Hussain, S.E. and Rasheeduzzafar and Al-Musallam, A. and Al-Gahtani, A.S.,** 1995. Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, Cement and Concrete Research, **25**, 1543–1555.

[12] **ASTM C 1202,** 1997. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, U.S.A.

[13] **Tokyay, M. ve Erdoğdu, K.,** 2005. Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar, TÇMB/AR-GE/Y97-2, 6. Baskı, **Şubat**

[14] **Klinghoffer, O. and Frolund, T. and Poulsen, E,** Rebar Corrosion Rate Measurements for Service Life Estimates, Paper presented at the ACI Fall Convention 2000, Toronto, Canada, Committee 365 "Practical Application of Service Life Models"

[15] **Wei-Ming, H. and Ping-Kun, C. and Chao-Lung, H.,** 2004. A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag, Cement and Concrete Research, **34,** 615-622

[16] **Tuutti, K.,** 1982. Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stochkolm.

[17] **Youping, L.,** 1996. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures, Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Blacksburg, Virginia

[18] **Muralidharana, S. and Vedalakshmia, R. and Saraswathia, V. and Josephb, J. and Palaniswamya, N.,** 2005. Studies on the aspects of chloride ion determination in different types of concrete under macro-cell corrosion conditions, Building and Environment, **40**, 1275-1281

[19] **ASTM G 15**, 1997. Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing, American Society for Testing and Materials, USA

[20] **TS EN 934-2**, 2002. Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet için_Bölüm 2: Beton Katkıları-Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü

[21] **Stern, M., and Geary, A. L.** 1957. Electrochemical Polarization No. 1: Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curve, Journal of Electrochemical Society, Vol. **104**, pp. 56-63.

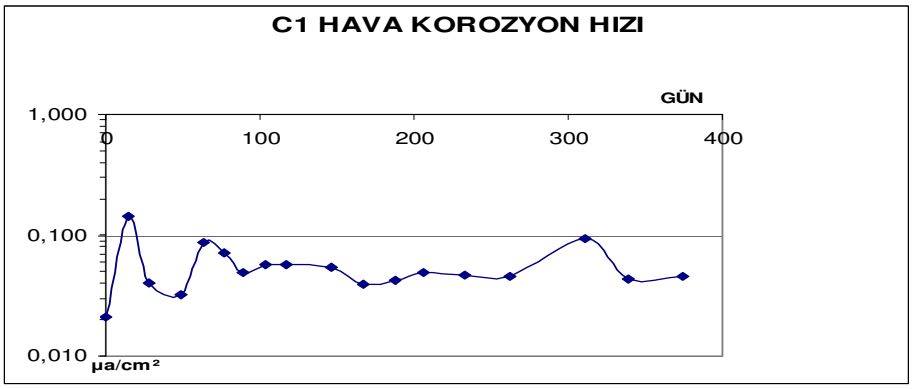
[22] **Luping, T.** 2002. Calibration of the Electrochemical Methods for the Corrosion Rate Measurement of Steel in Concrete, SP Swedish National Testing and Research Institute Building Technology SP REPORT : **25**

[23] **ASTM G 59-97,** 1999. Standart Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, American Society for Testing and Materials, USA

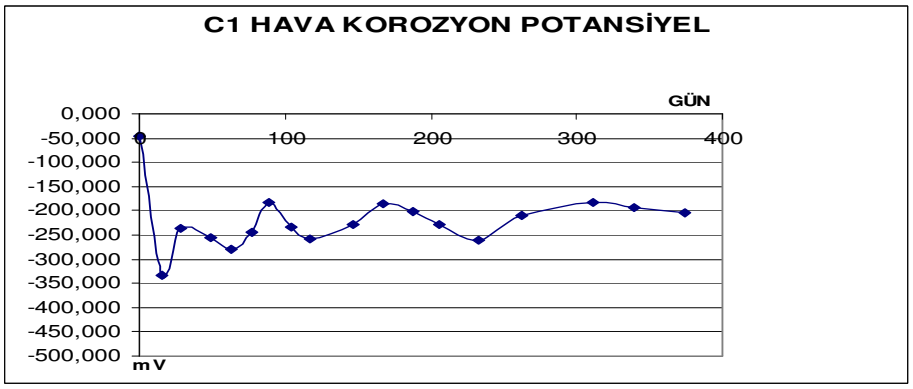
[24] **The GECOR8 Corrosion Rate Meter Instruction Manual**, 2002. James Instruments INC, Non Destructıve Testıng Systems, Second Edition, January

[25] **Stanish, K.D. and Hooton, R.D. and Thomas M.D.A.,** Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review, Department of Civil Engineering University of Toronto Toronto, Ontario, Canada

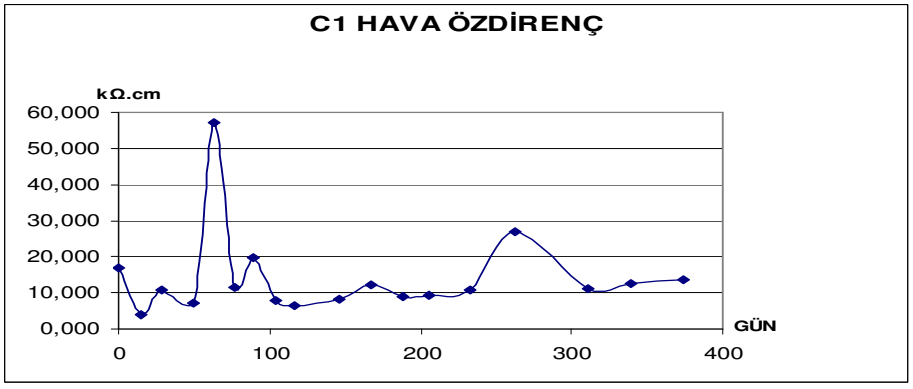
EK – A HAVA KÜRÜ NUMUNELERİNİN KOROZYON HIZI (LİNEER POLARİZASYON), KOROZYON POTANSİYELİ (YARI HÜCRE POTANSİYELİ) ve ÖZDİRENÇ ÖLÇÜMLERİNE AİT GRAFİKLER



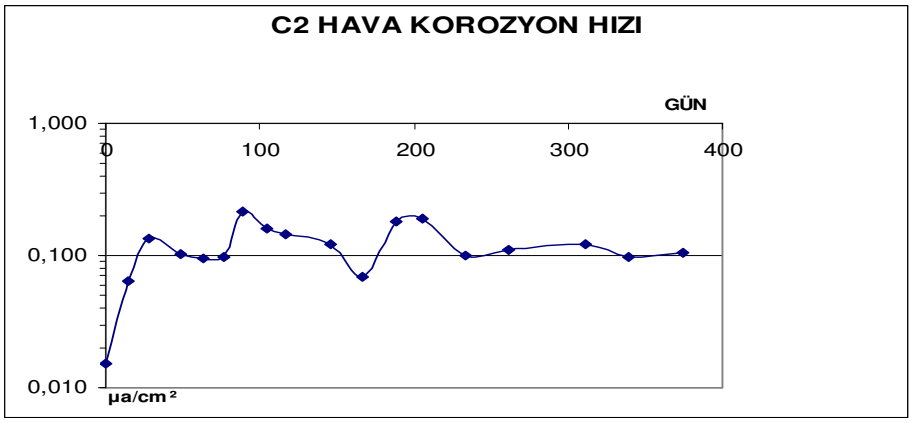
Şekil A.1: Hava Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



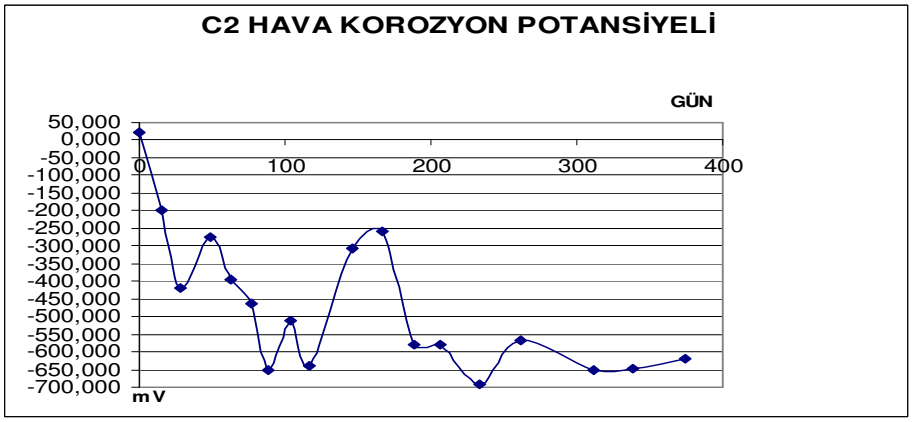
Şekil A.2: Hava Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



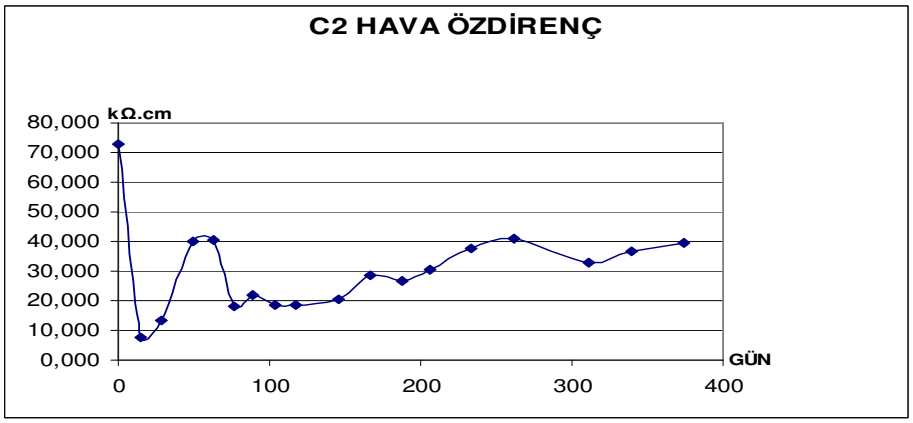
Şekil A.3: Hava Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



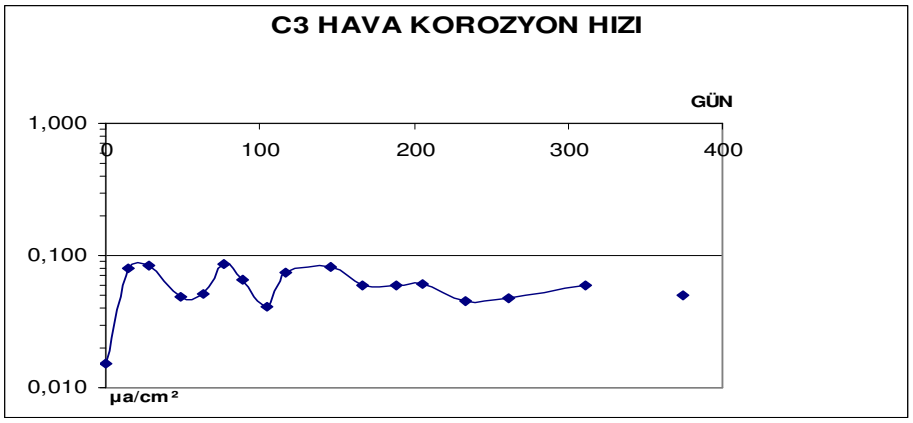
Şekil A.4: Hava Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



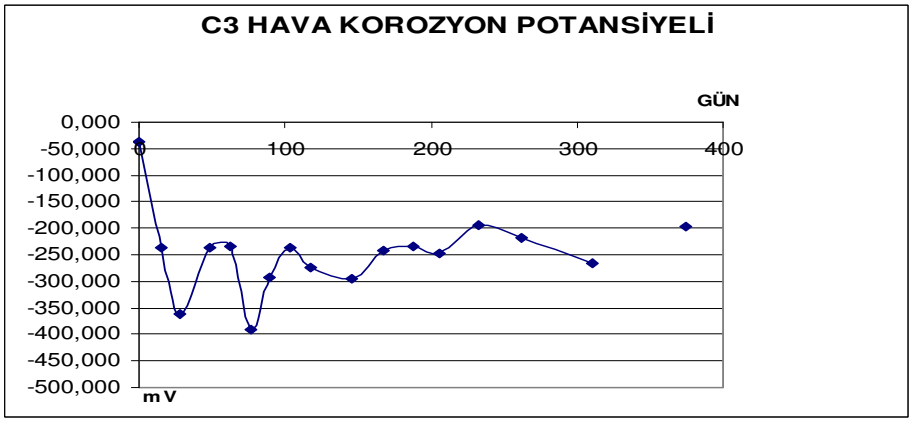
Şekil A.5: Hava Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



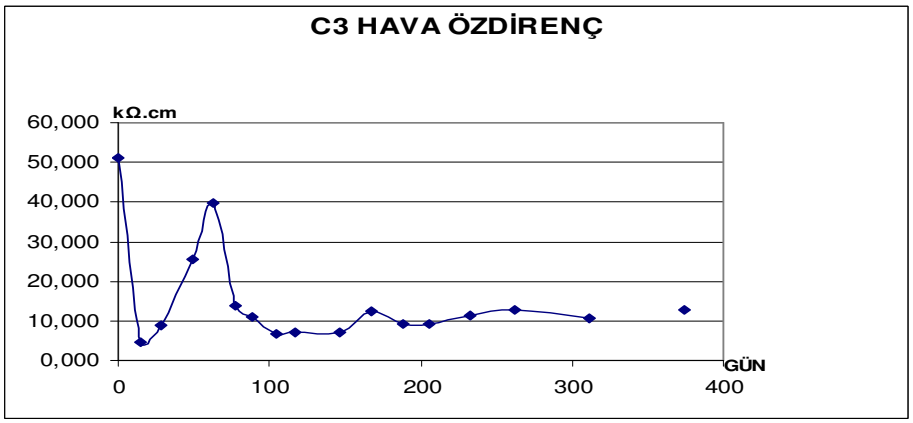
Şekil A.6: Hava Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



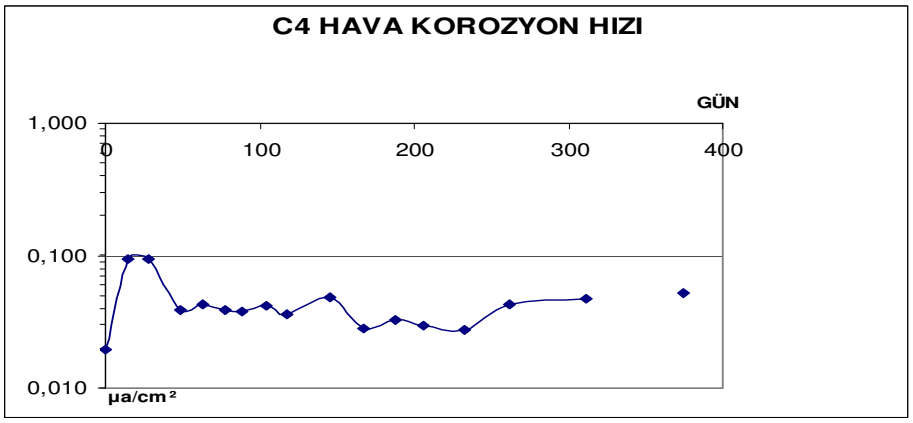
Şekil A.7: Hava Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



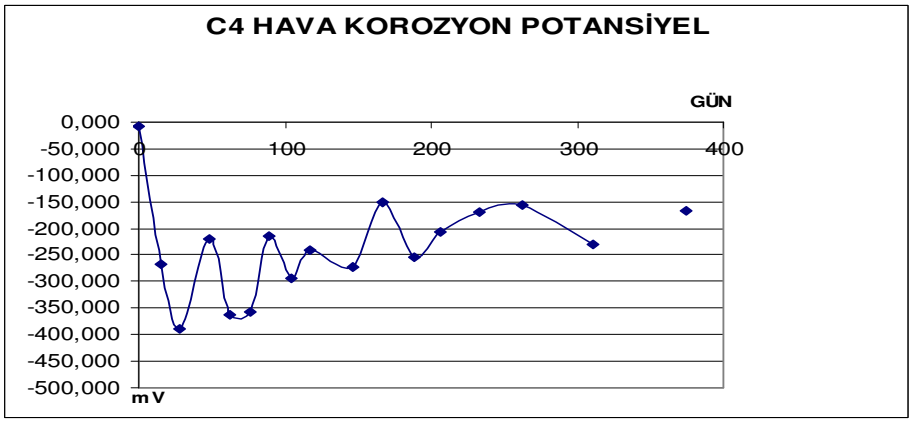
Şekil A.8: Hava Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



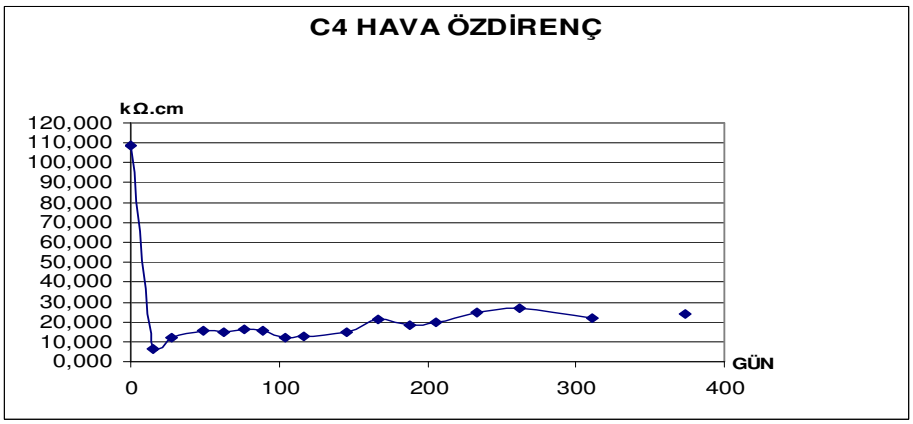
Şekil A.9 Hava Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



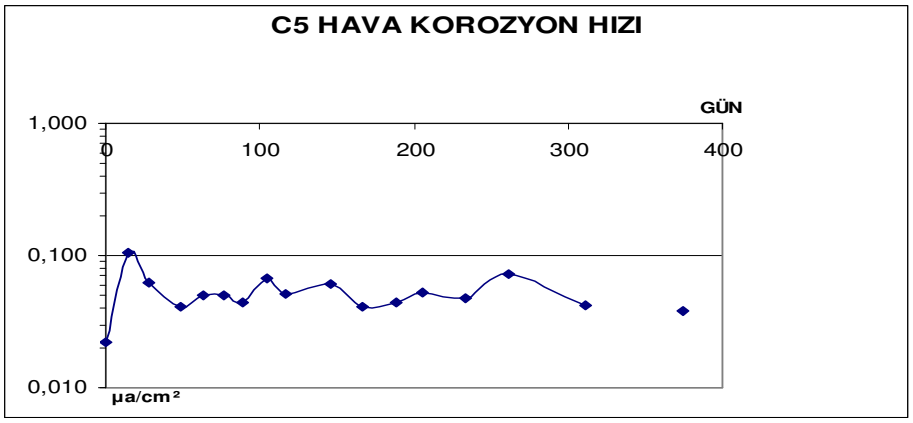
Şekil A.10: Hava Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



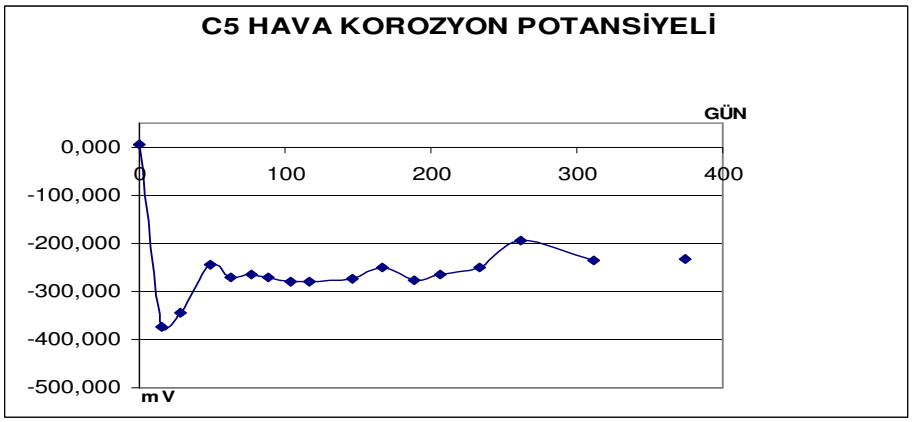
Şekil A.11: Hava Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



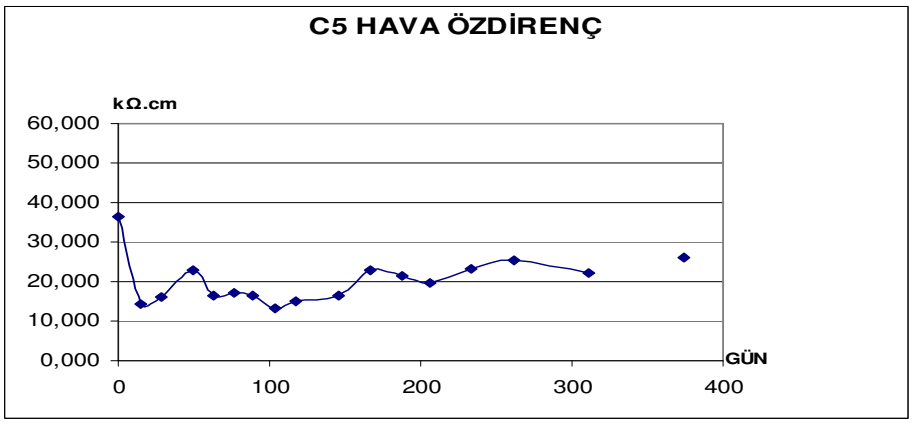
Şekil A.12: Hava Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



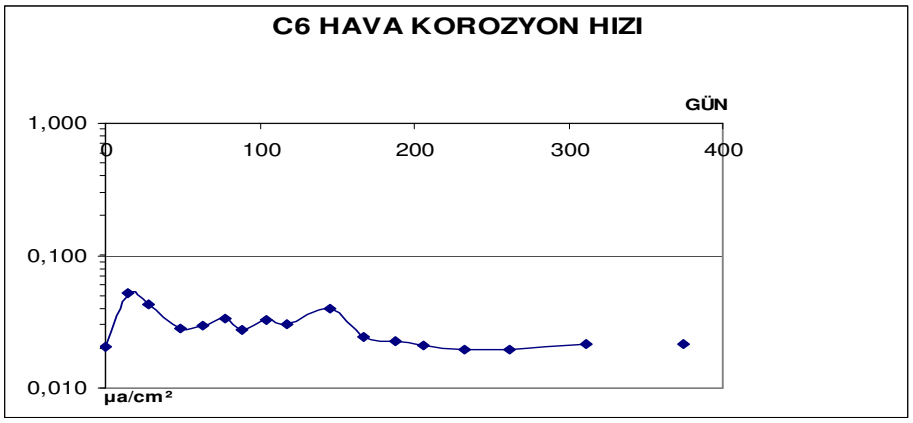
Şekil A.13: Hava Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



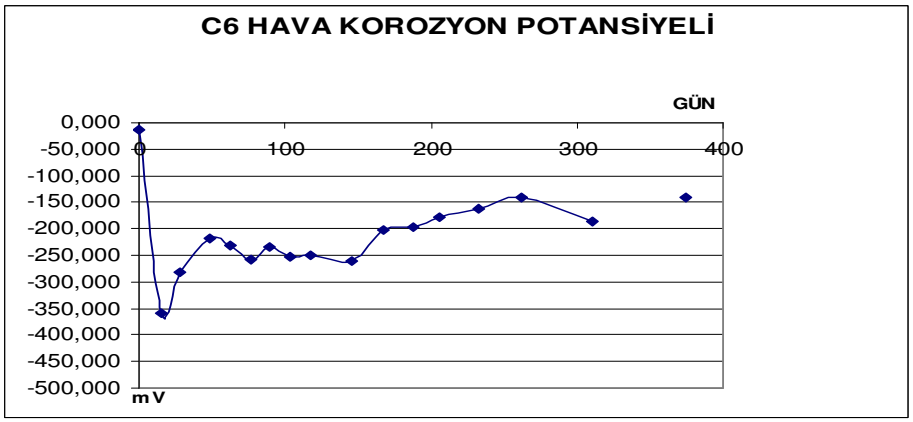
Şekil A.14: Hava Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



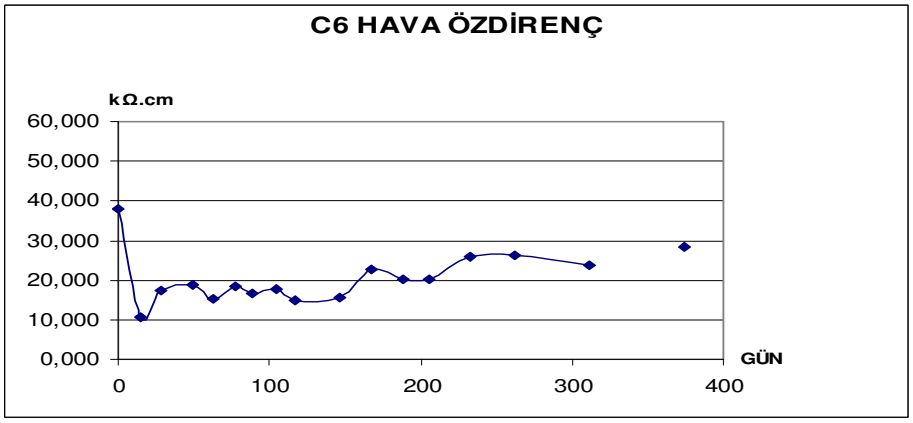
Şekil A.15: Hava Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



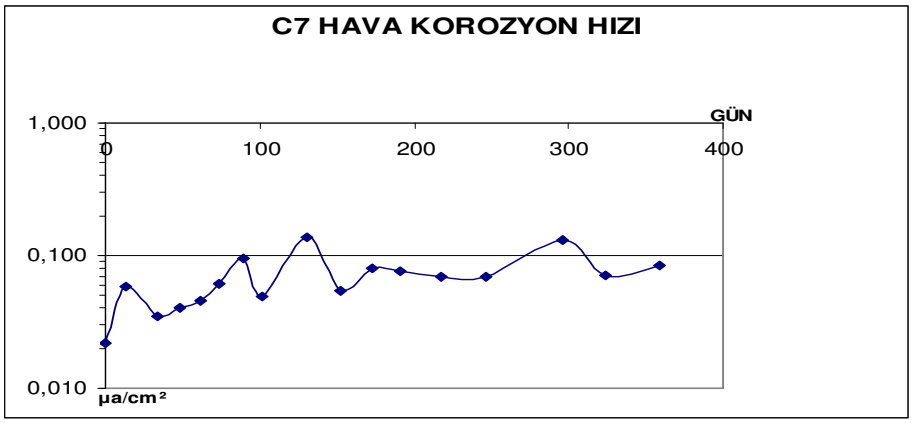
Şekil A.16: Hava Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



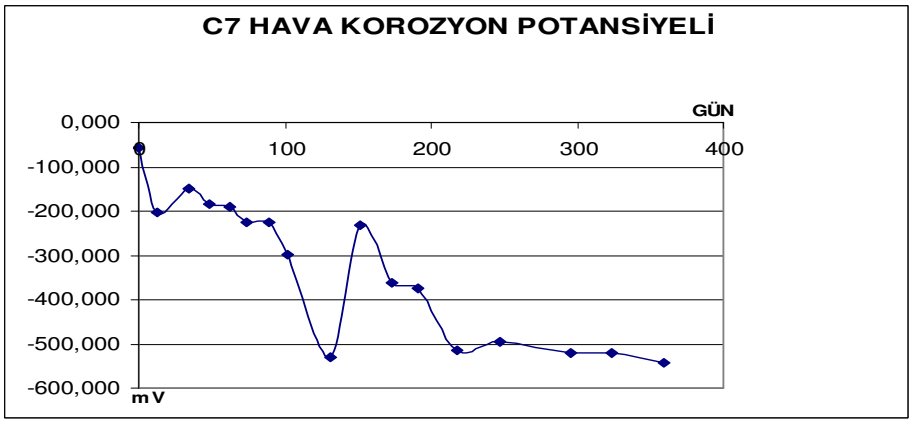
Şekil A.17: Hava Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



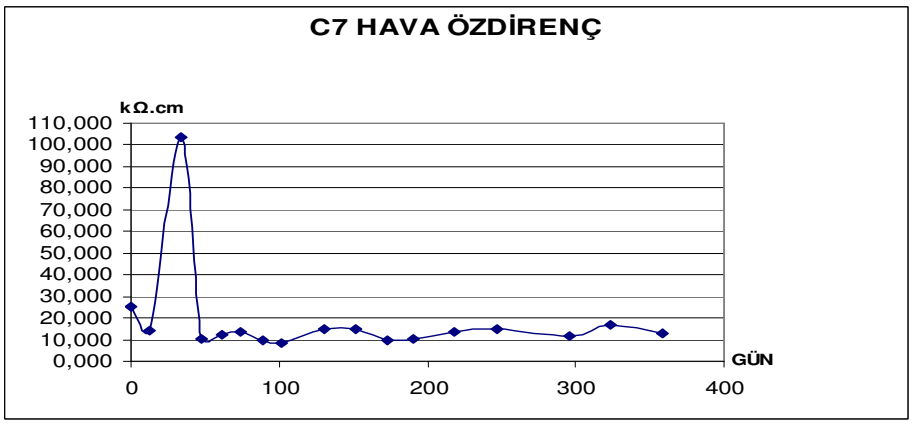
Şekil A.18: Hava Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



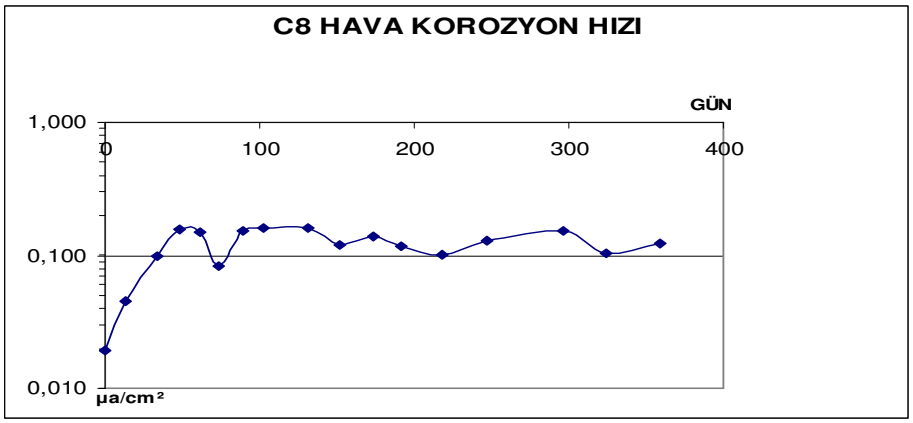
Şekil A.19: Hava Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



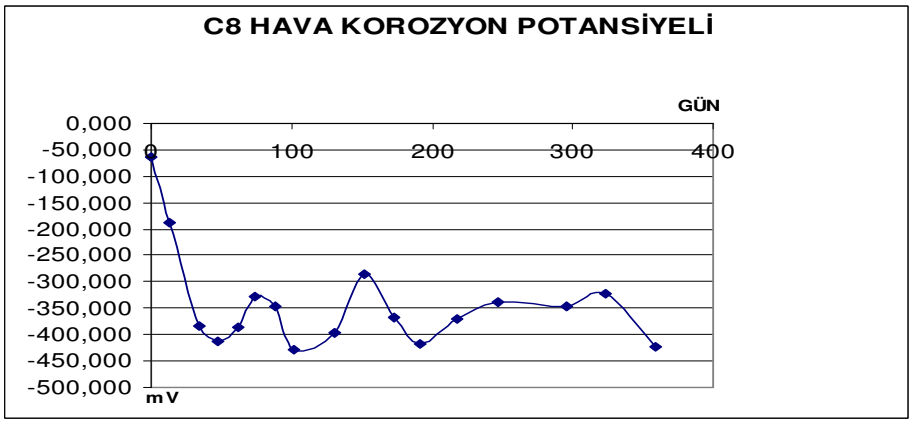
Şekil A.20: Hava Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



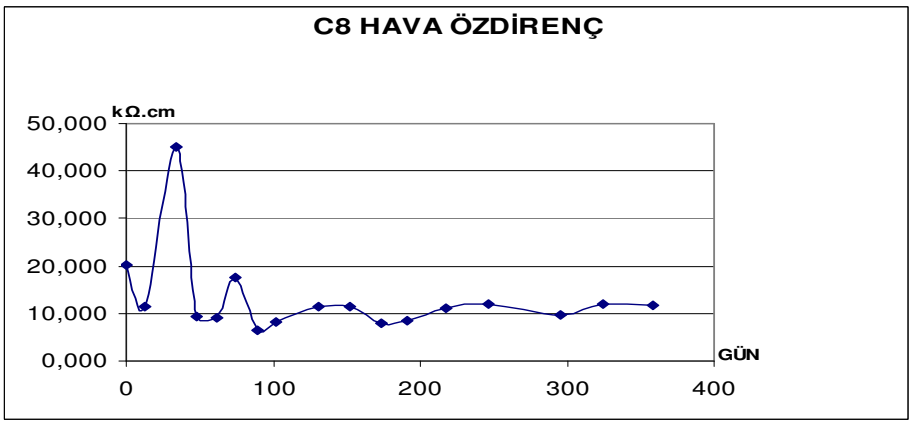
Şekil A.21: Hava Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



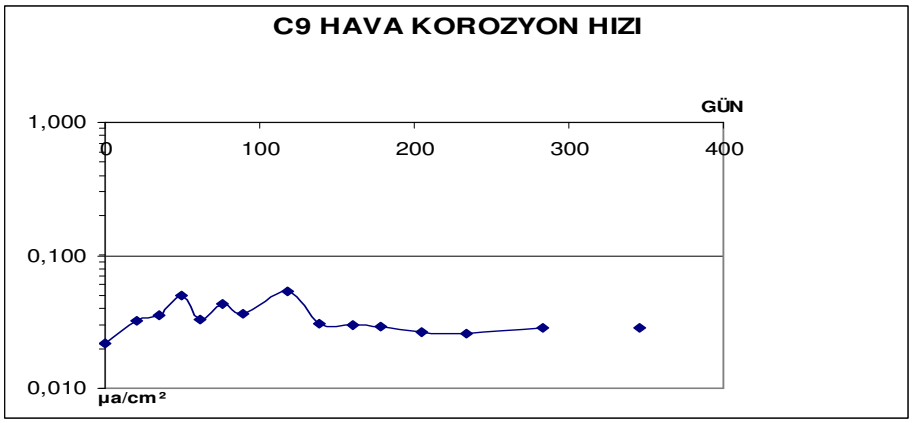
Şekil A.22: Hava Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



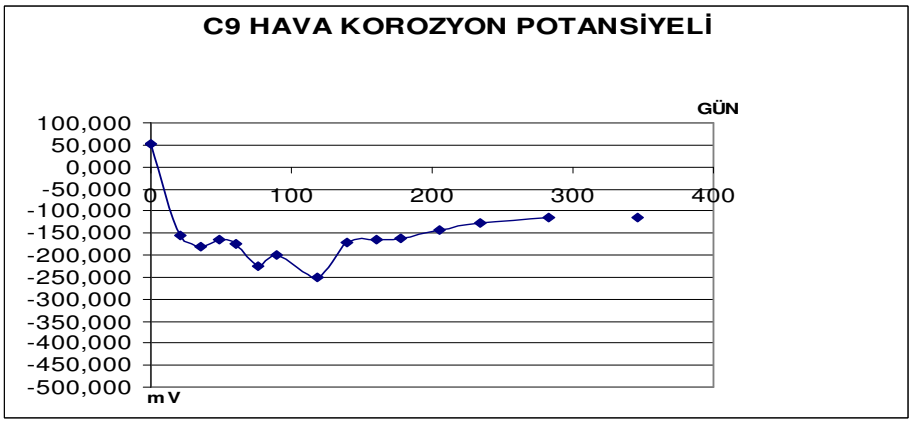
Şekil A.23: Hava Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



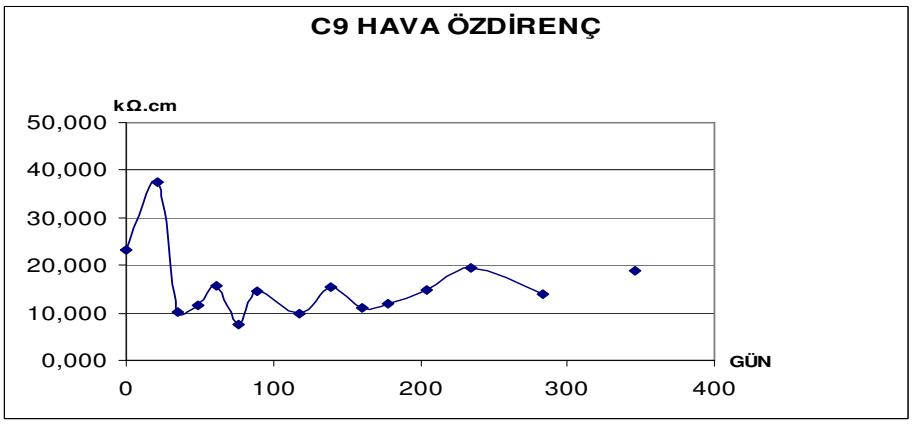
Şekil A.24: Hava Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



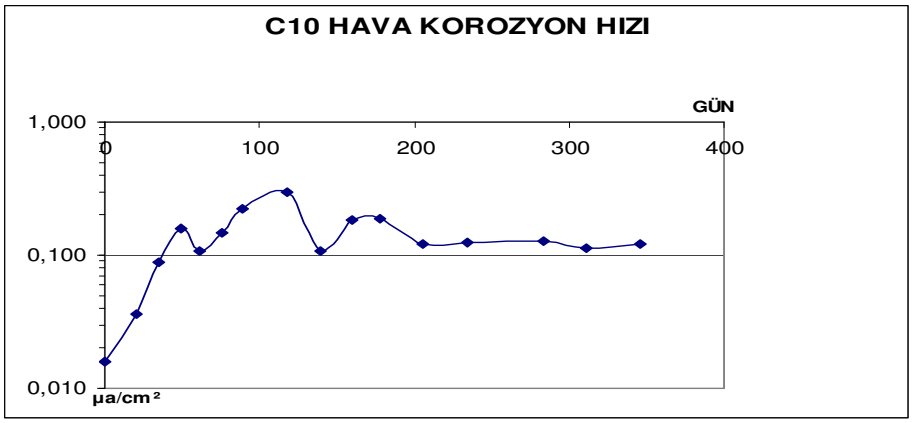
Şekil A.25: Hava Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



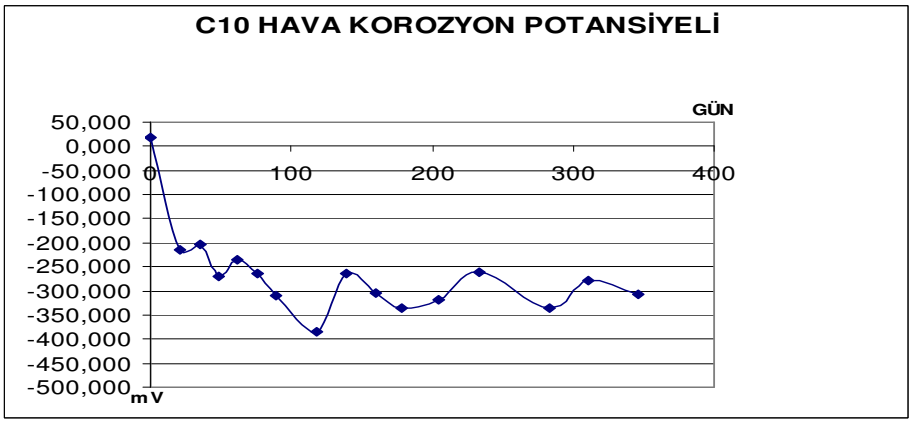
Şekil A.26: Hava Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



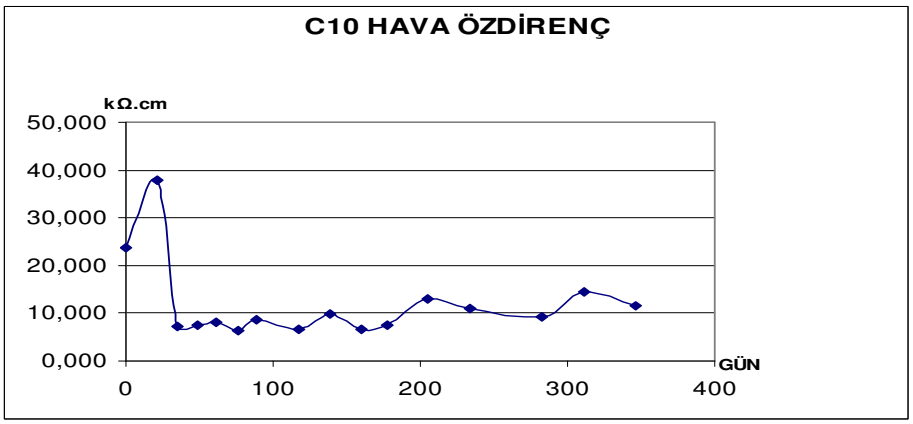
Şekil A.27: Hava Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



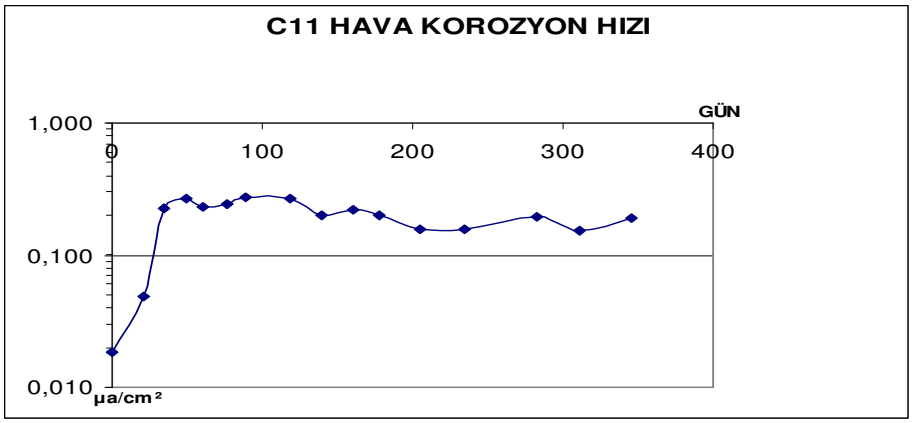
Şekil A.28: Hava Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



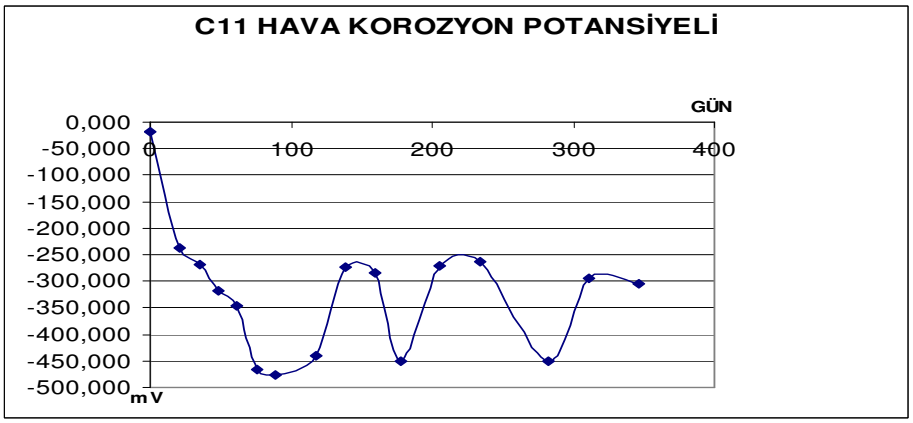
Şekil A.29: Hava Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



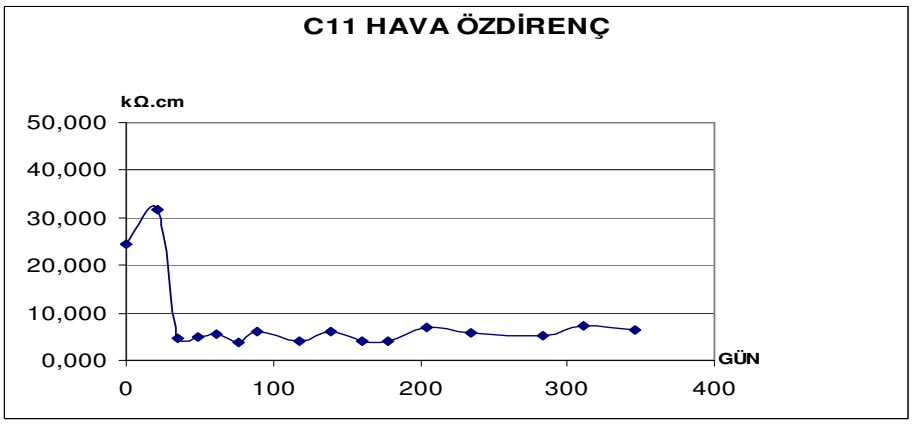
Şekil A.30: Hava Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



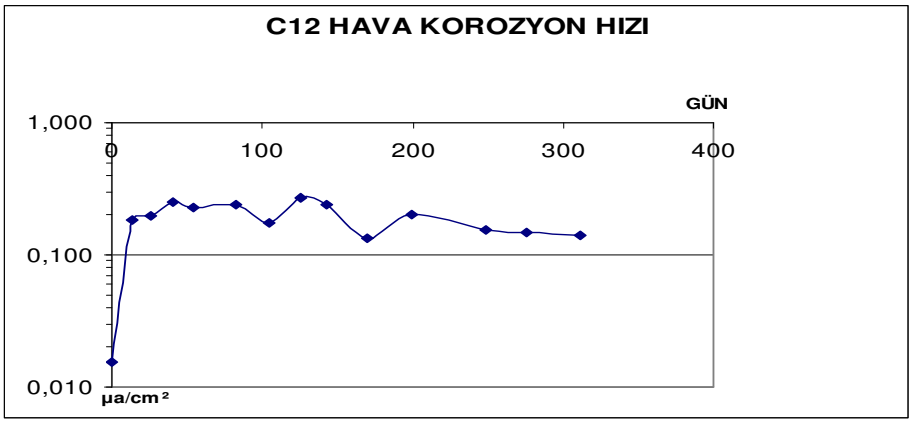
Şekil A.31: Hava Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



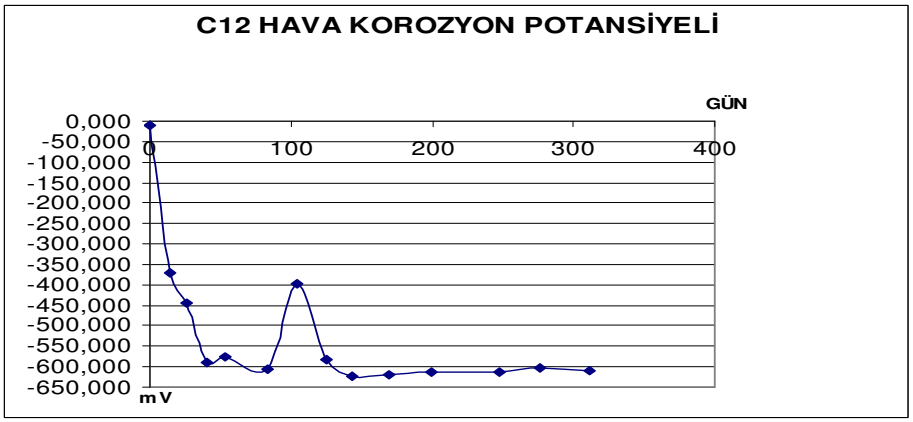
Şekil A.32: Hava Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



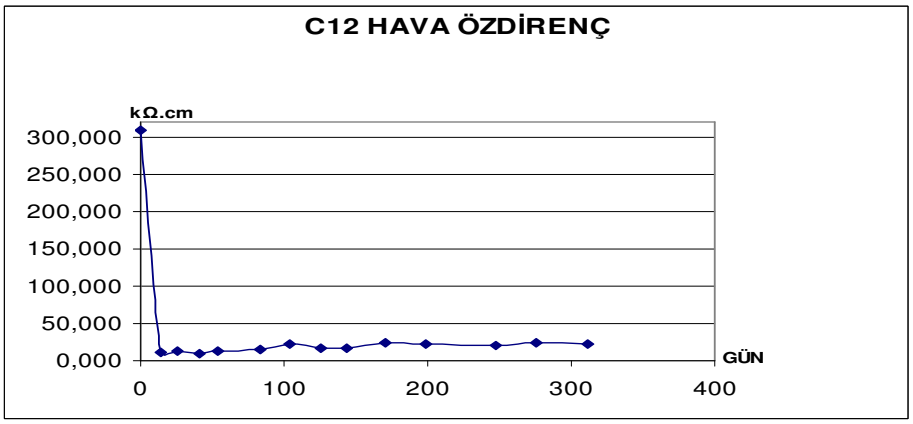
Şekil A.33: Hava Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



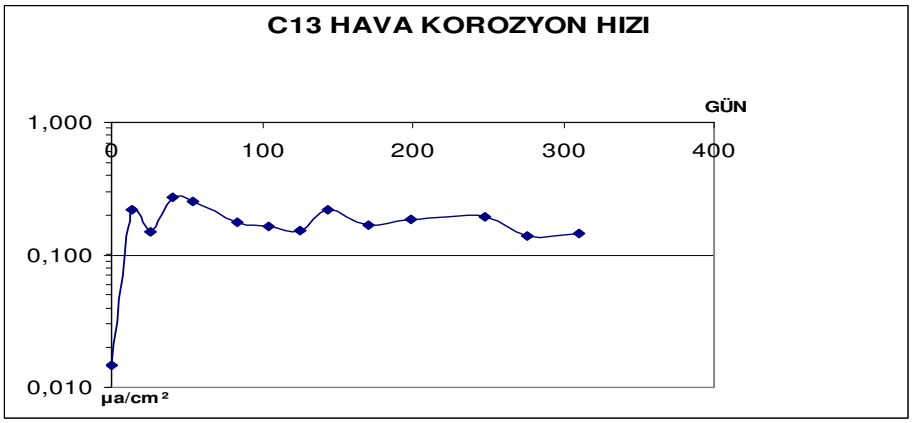
Şekil A.34: Hava Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



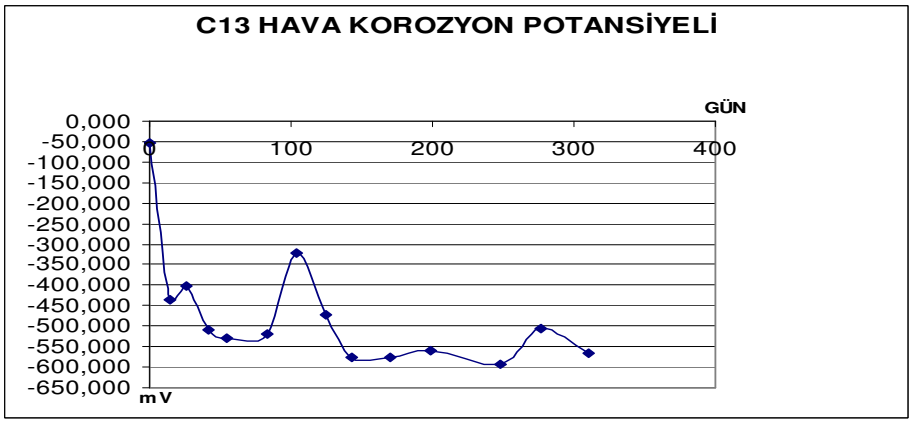
Şekil A.35: Hava Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



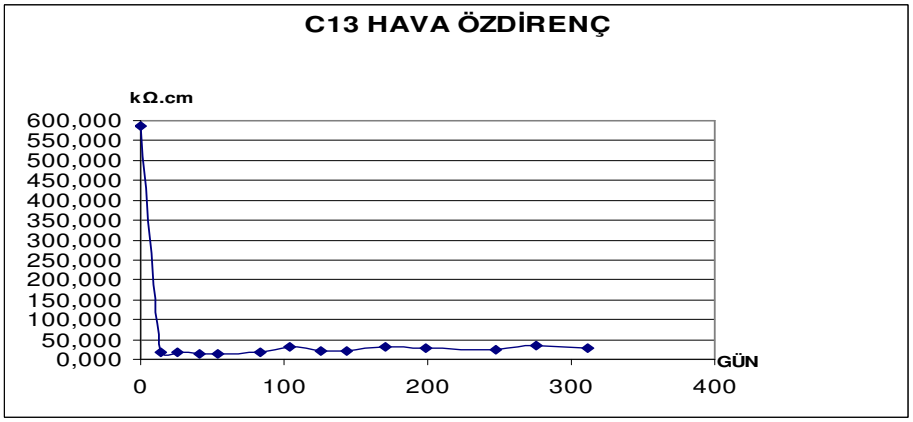
Şekil A.36: Hava Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



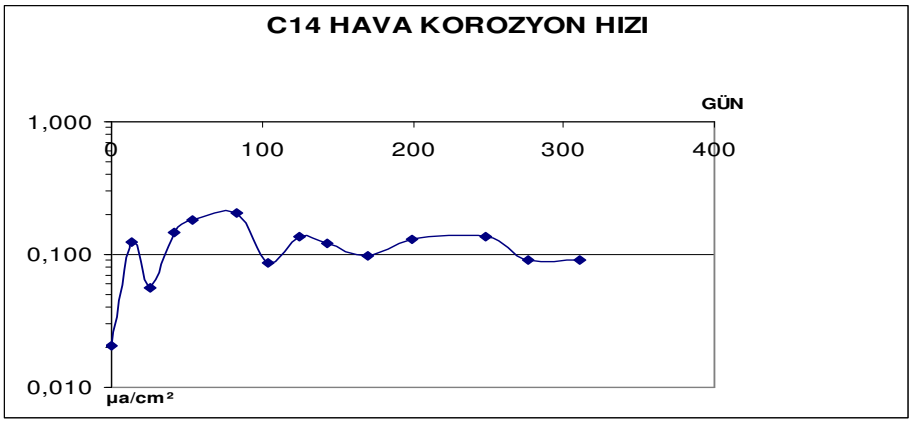
Şekil A.37: Hava Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



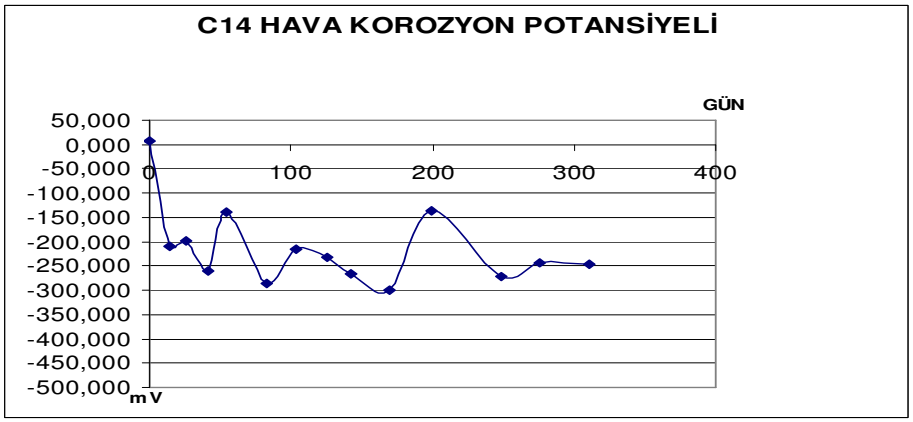
Şekil A.38: Hava Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



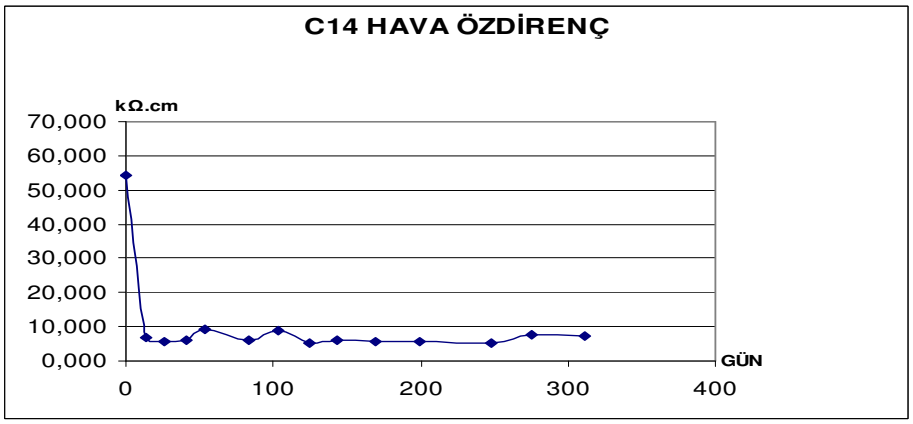
Şekil A.39: Hava Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



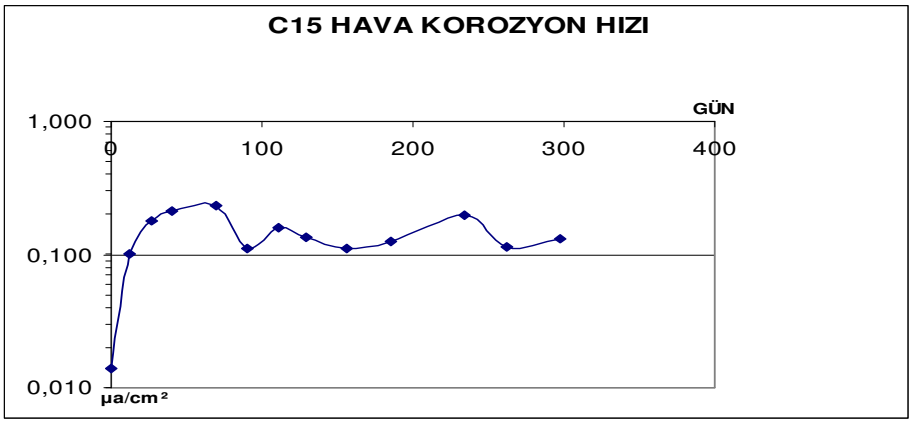
Şekil A.40: Hava Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



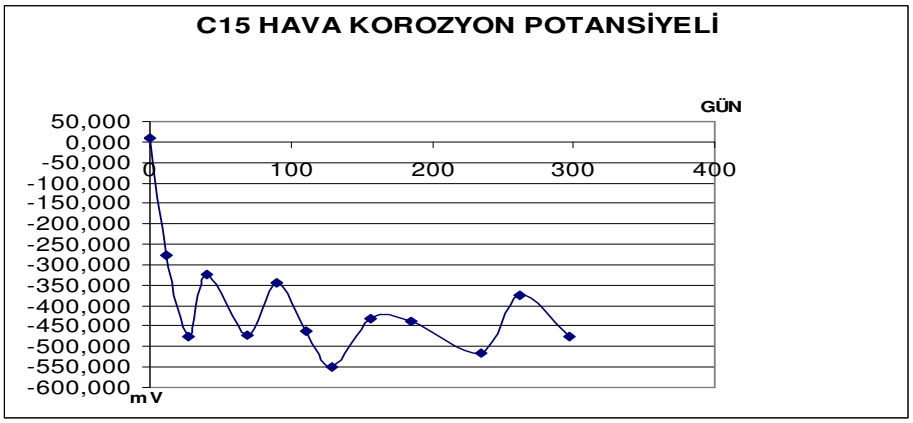
Şekil A.41: Hava Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



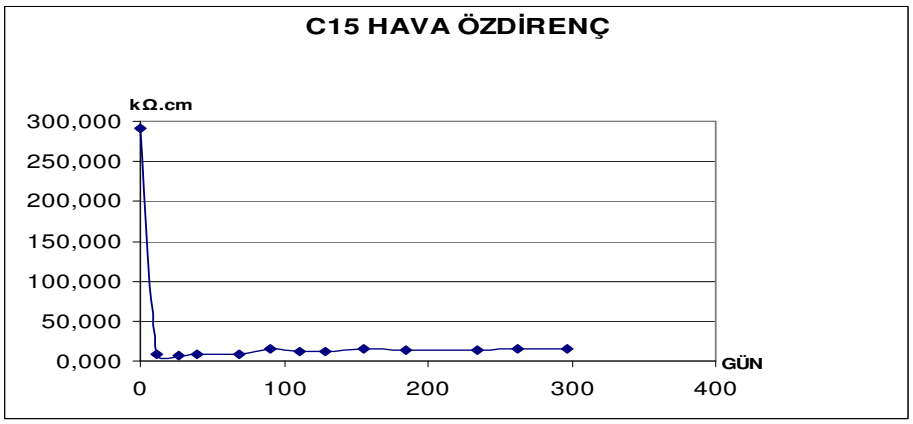
Şekil A.42: Hava Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



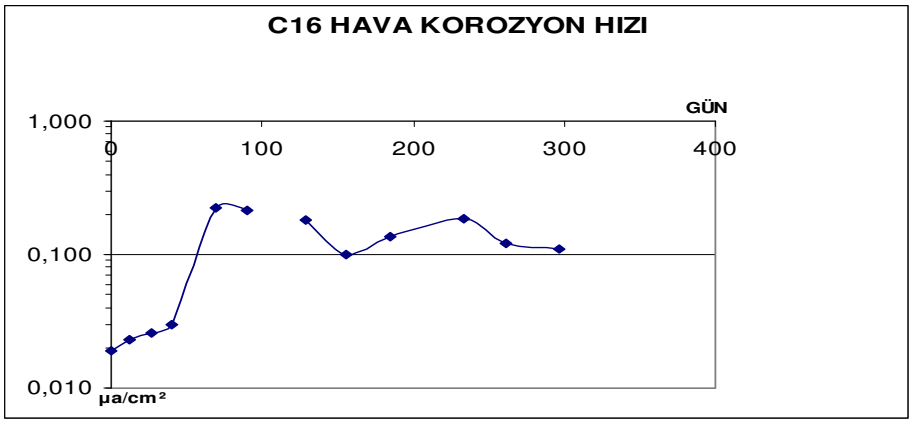
Şekil A.43: Hava Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



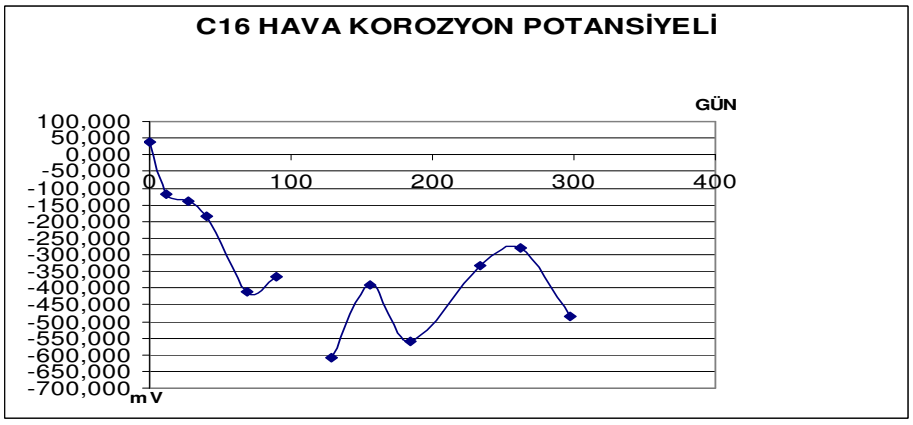
Şekil A.44: Hava Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



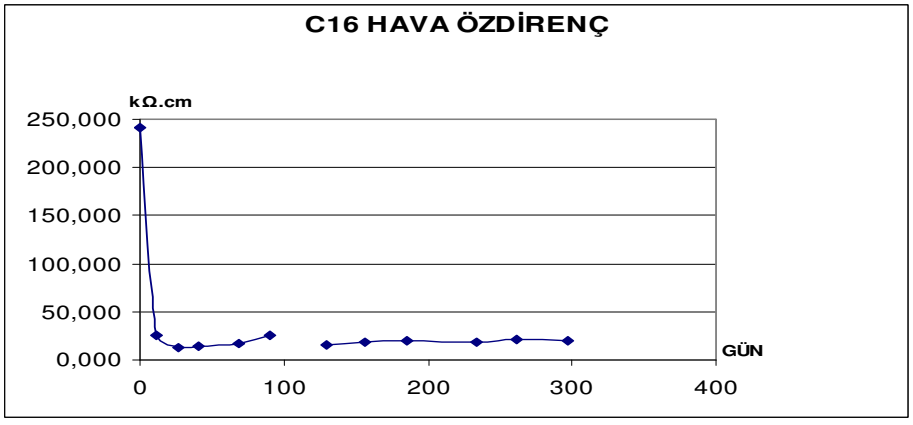
Şekil A.45: Hava Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



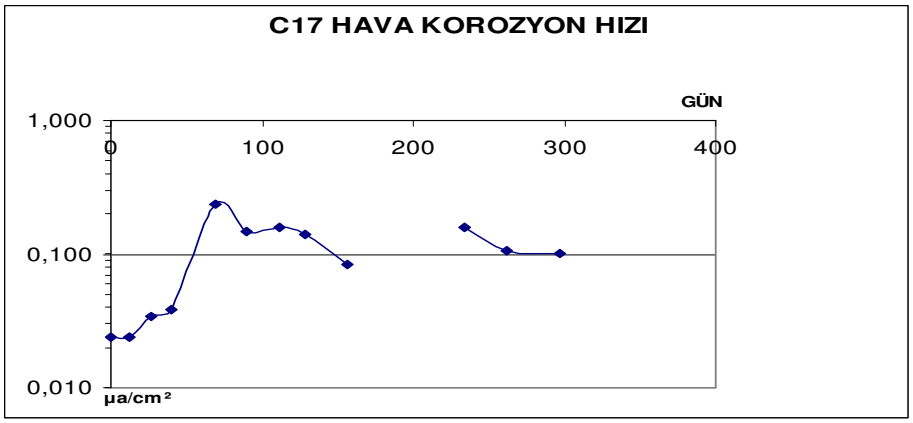
Şekil A.46: Hava Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



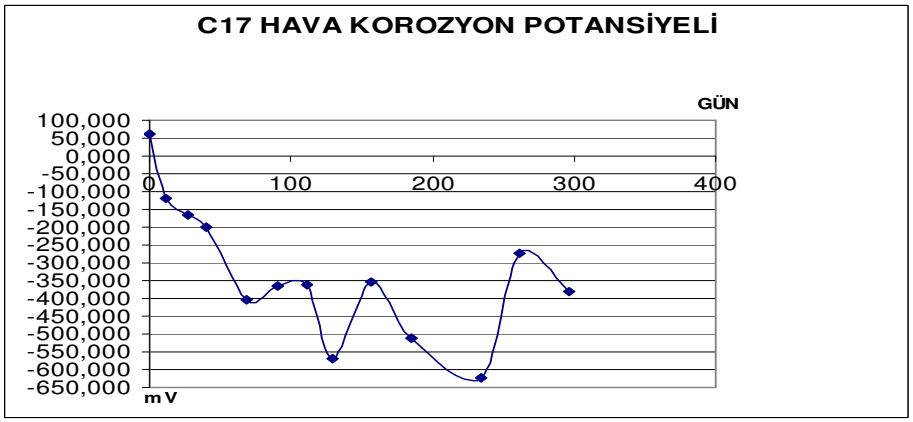
Şekil A.47: Hava Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



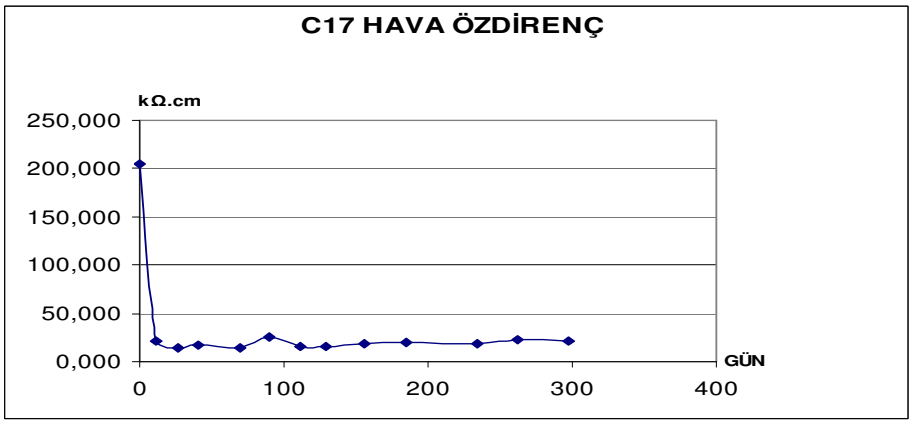
Şekil A.48: Hava Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



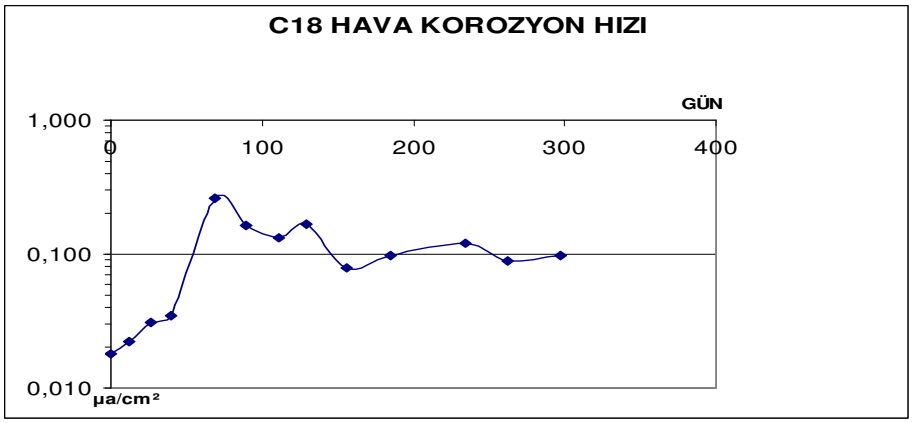
Şekil A.49: Hava Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



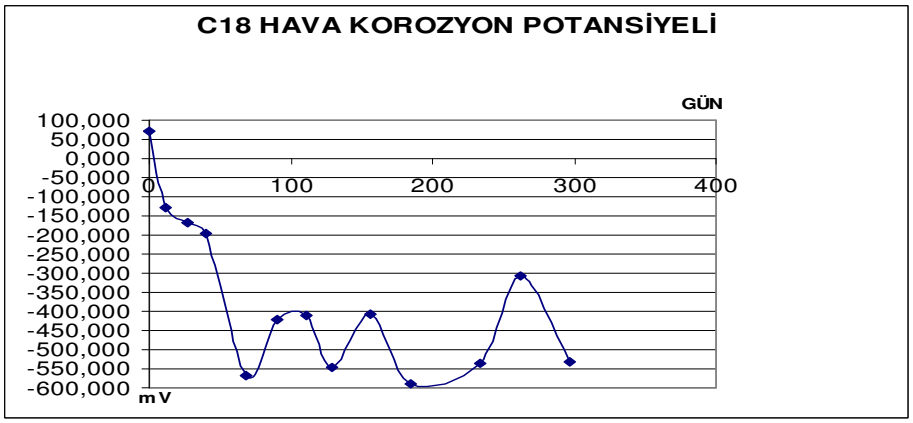
Şekil A.50: Hava Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



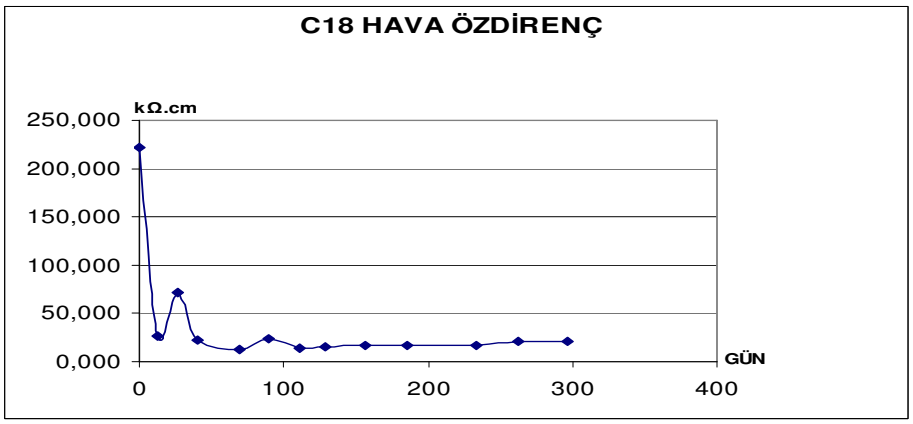
Şekil A.51: Hava Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



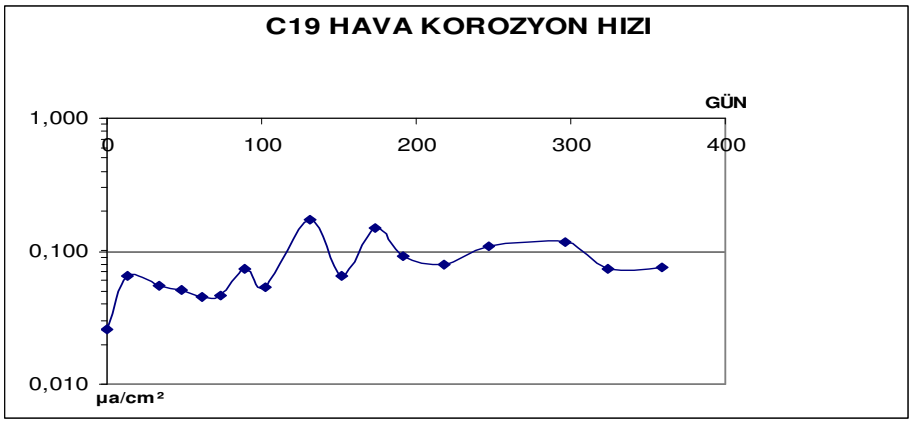
Şekil A.52: Hava Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



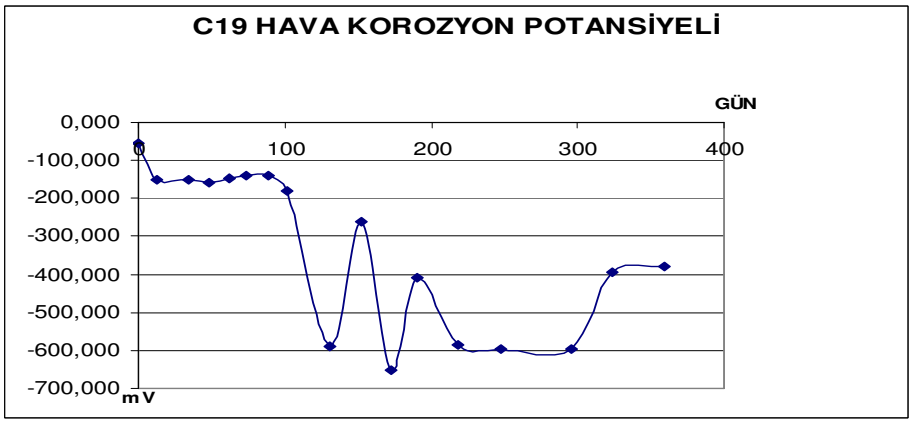
Şekil A.53: Hava Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



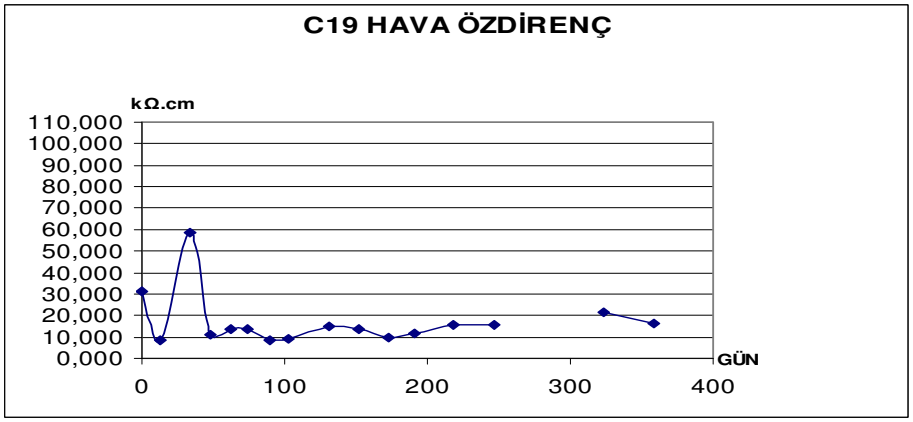
Şekil A.54: Hava Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



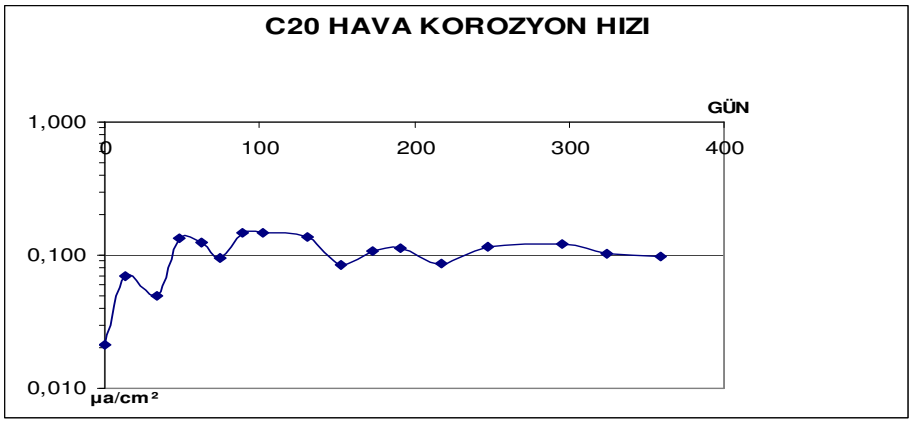
Şekil A.55: Hava Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



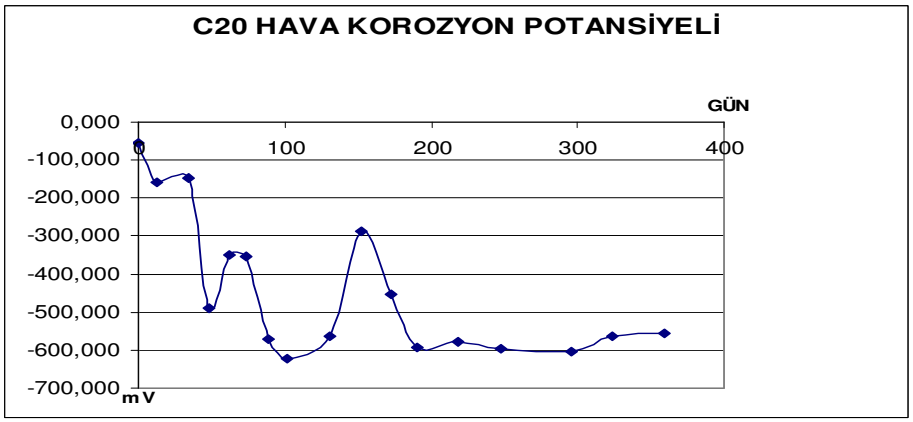
Şekil A.56: Hava Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



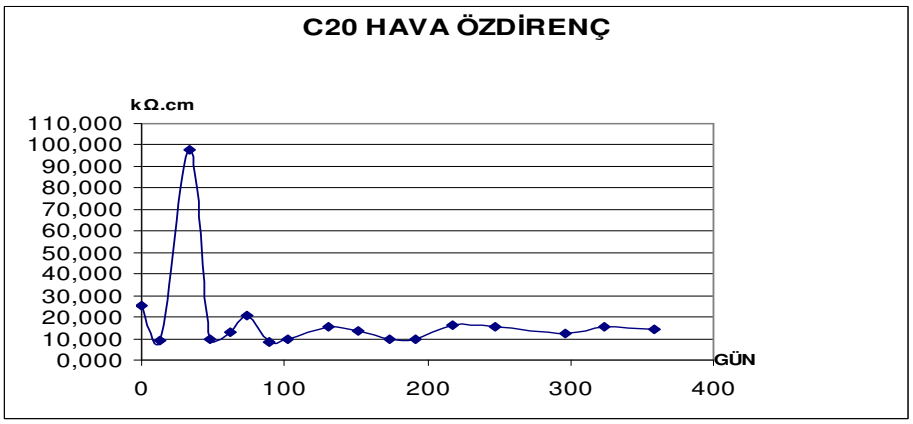
Şekil A.57: Hava Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



Şekil A.58: Hava Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

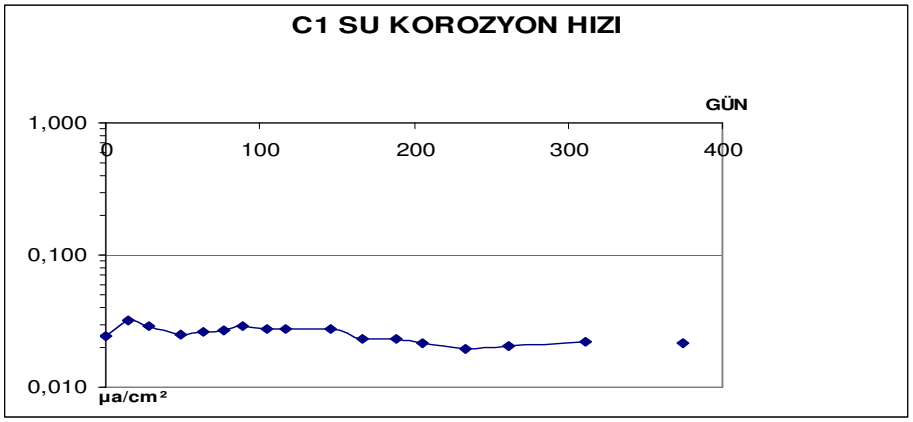


Şekil A.59: Hava Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi

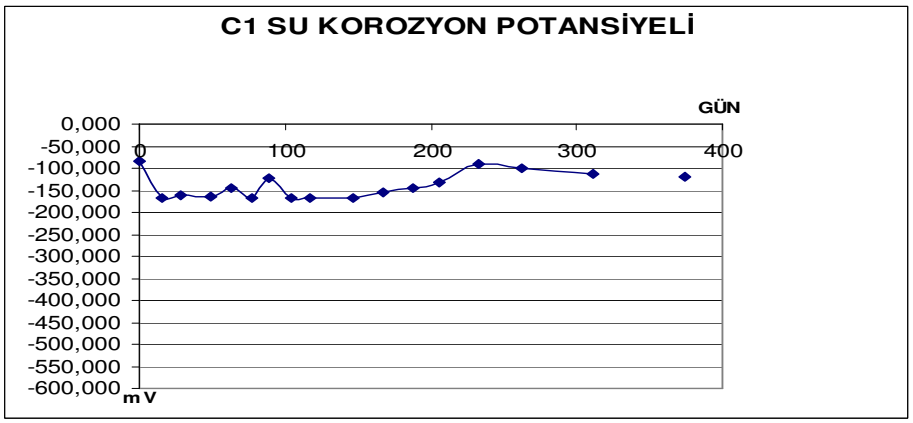


Şekil A.60: Hava Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

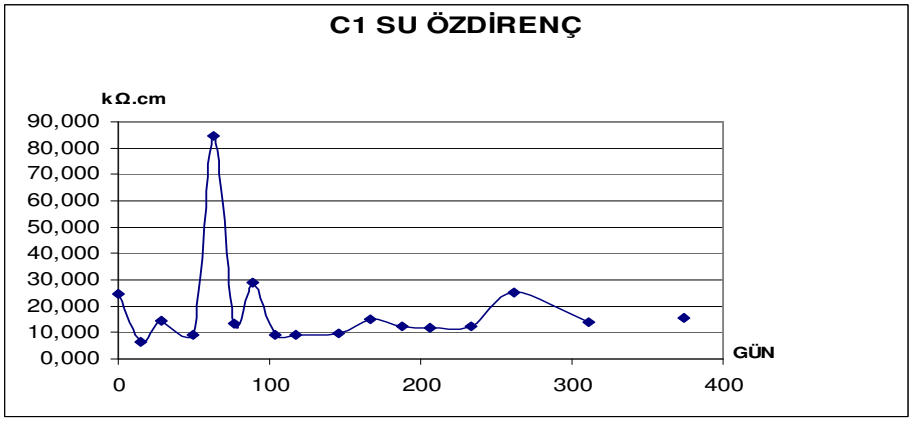
EK – B SU KÜRÜ NUMUNELERİNİN KOROZYON HIZI (LİNEER POLARİZASYON), KOROZYON POTANSİYELİ (YARI HÜCRE POTANSİYELİ) ve ÖZDİRENÇ ÖLÇÜMLERİNE AİT GRAFİKLER



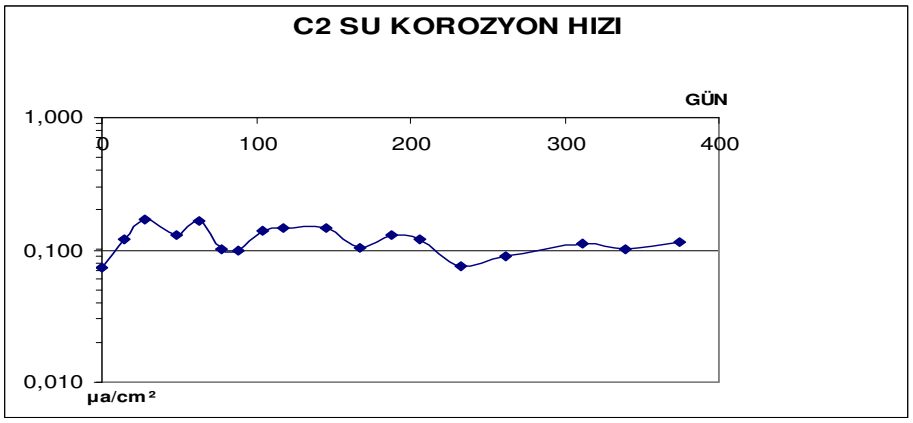
Şekil B.1: Su Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



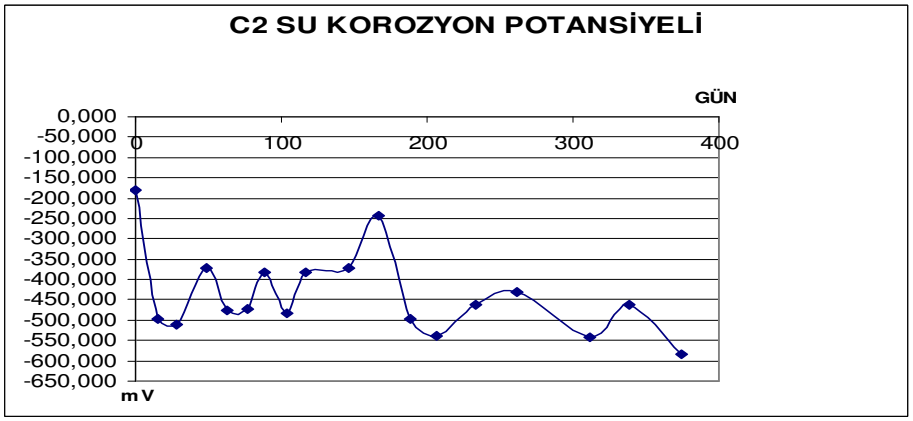
Şekil B.2: Su Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



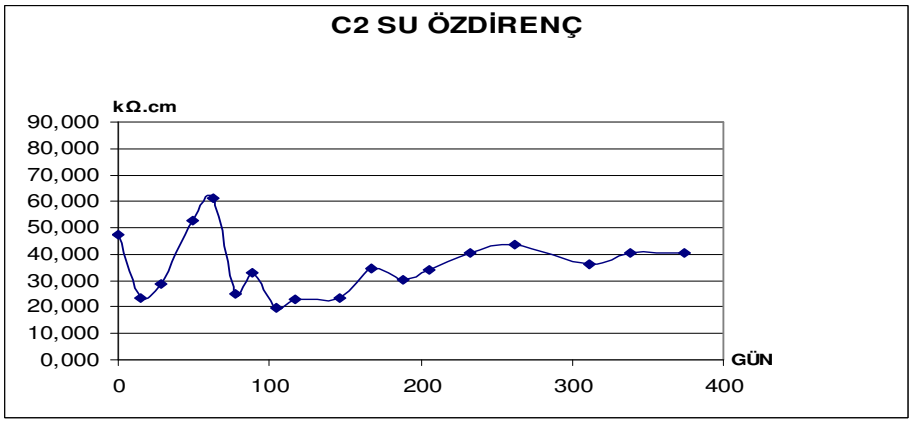
Şekil B.3: Su Kürü Uygulanmış C1 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



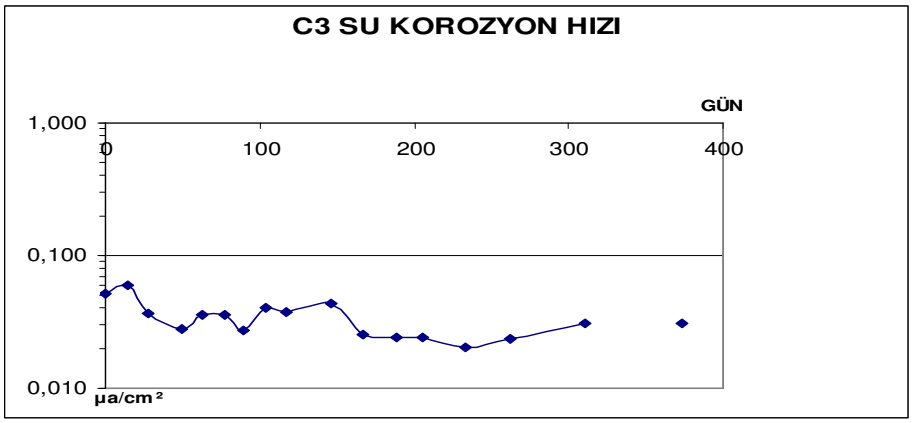
Şekil B.4: Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



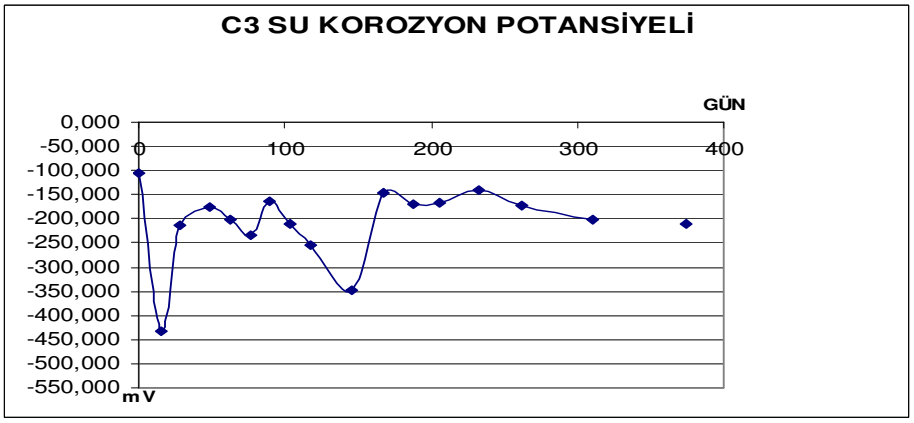
Şekil B.5: Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



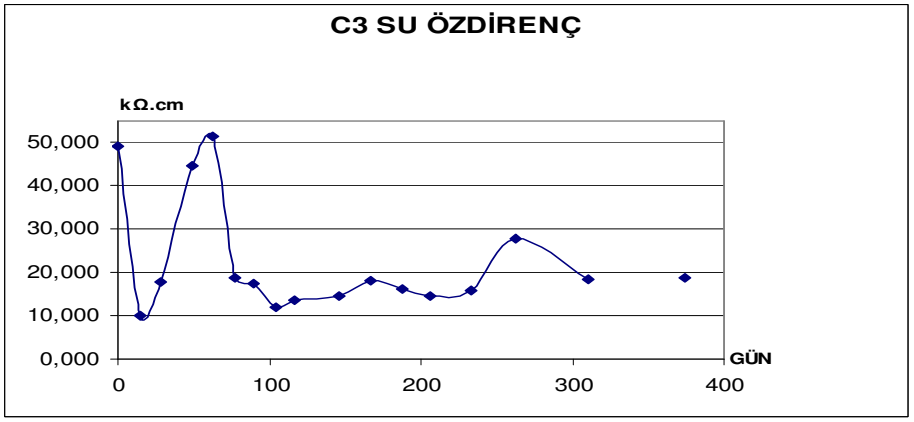
Şekil B.6: Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



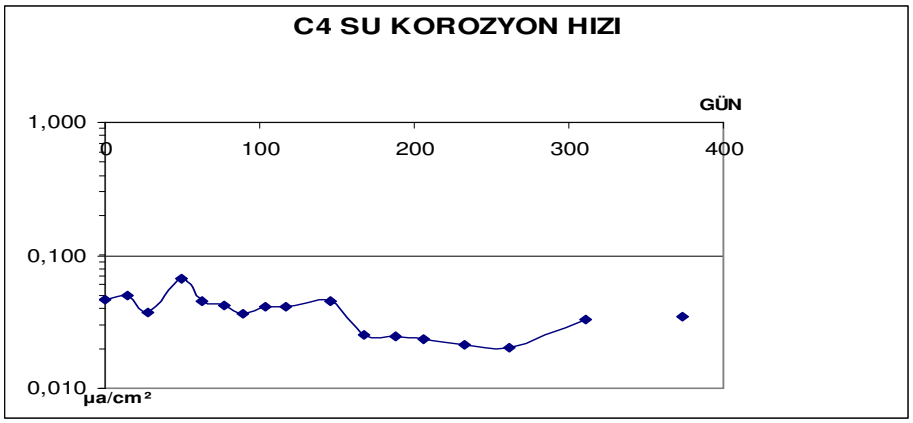
Şekil B.7: Su Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



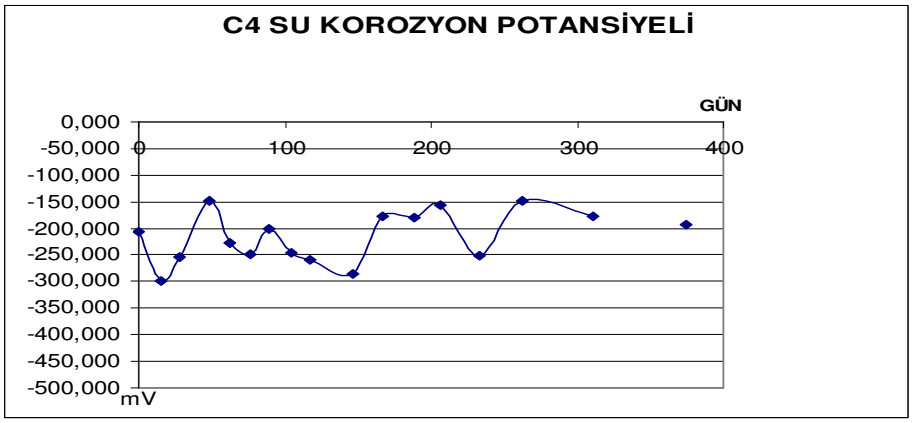
Şekil B.8: Su Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



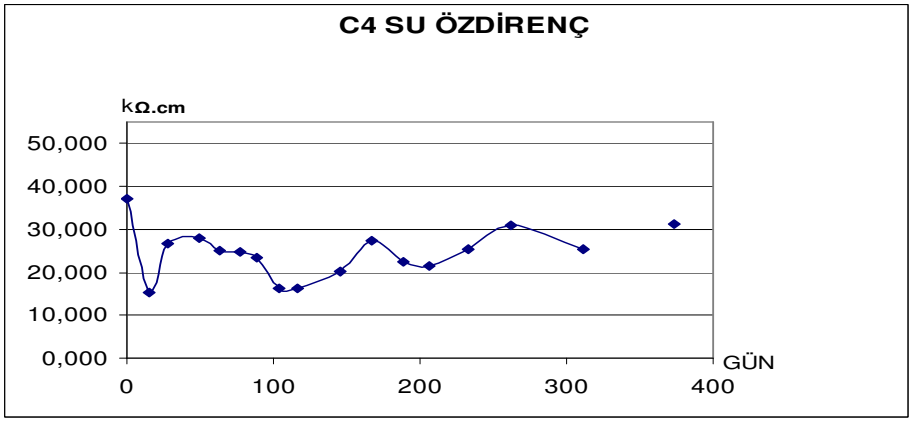
Şekil B.9: Su Kürü Uygulanmış C3 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



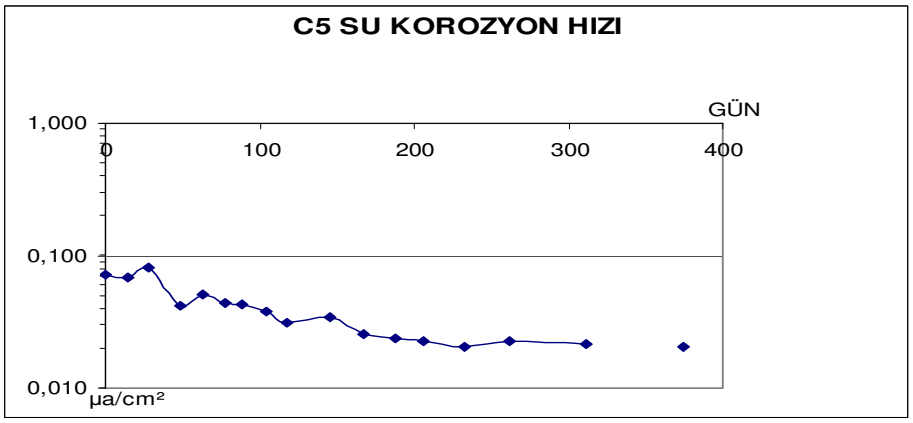
Şekil B.10: Su Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



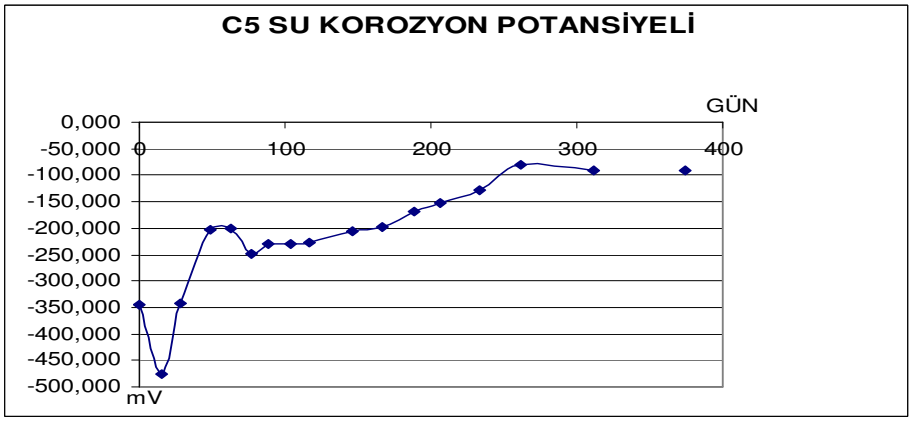
Şekil B.11: Su Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



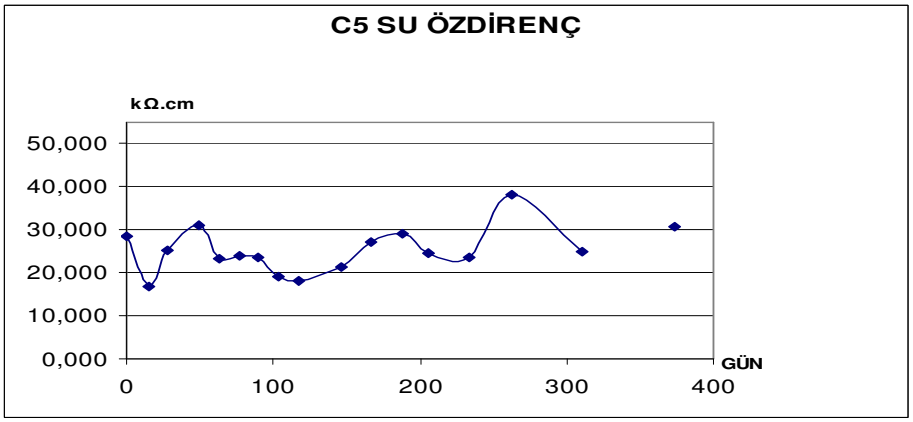
Şekil B.12: Su Kürü Uygulanmış C4 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



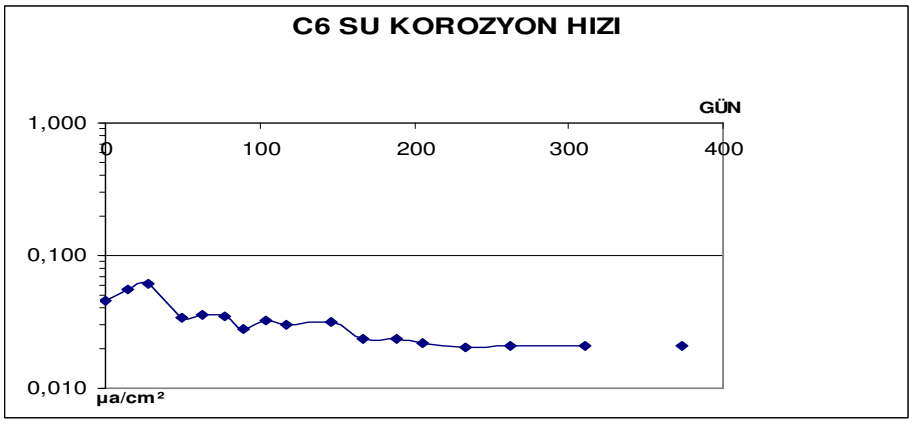
Şekil B.13: Su Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



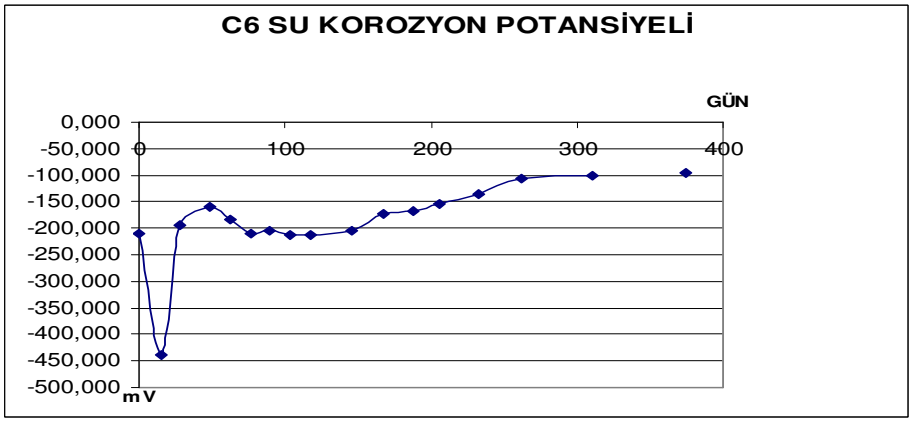
Şekil B.14: Su Kürü Uygulanmış C5 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



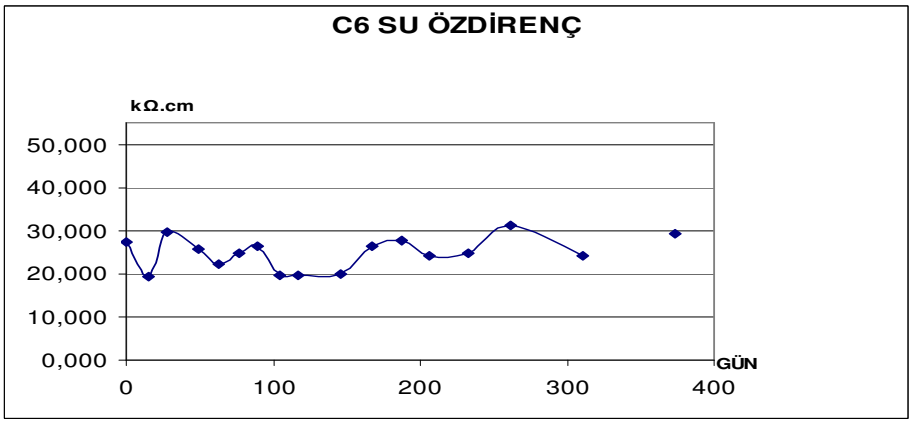
Şekil B.15: Su Kürü Uygulanmış C2 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



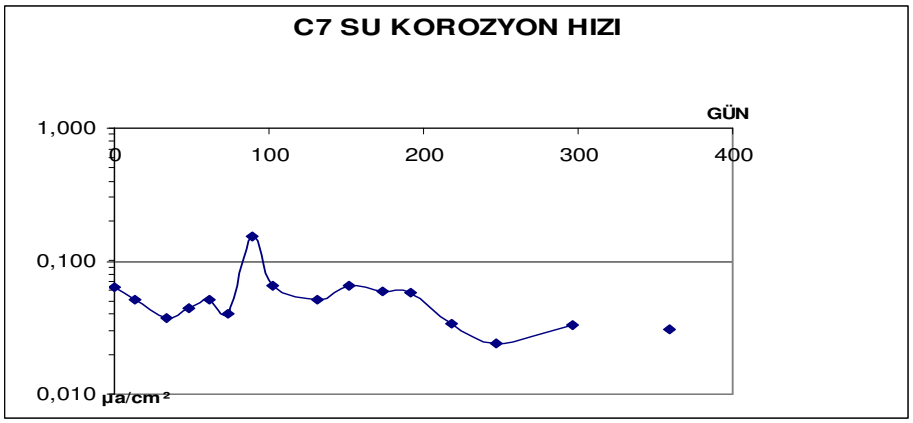
Şekil B.16: Su Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



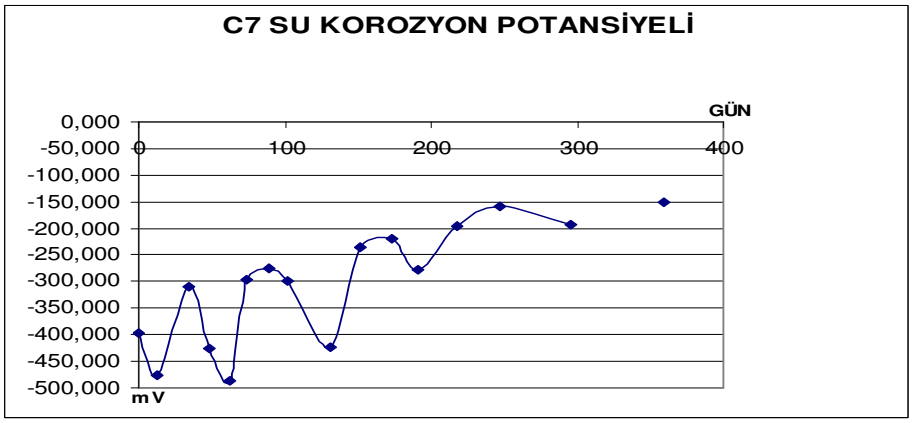
Şekil B.17: Su Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



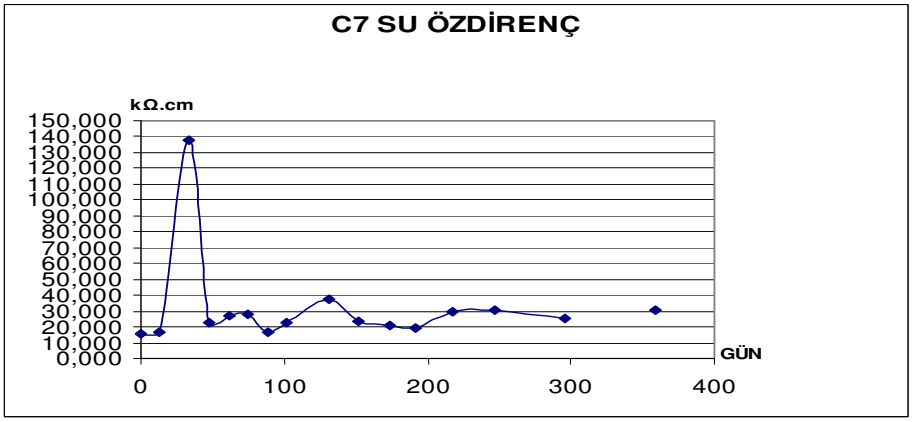
Şekil B.18: Su Kürü Uygulanmış C6 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



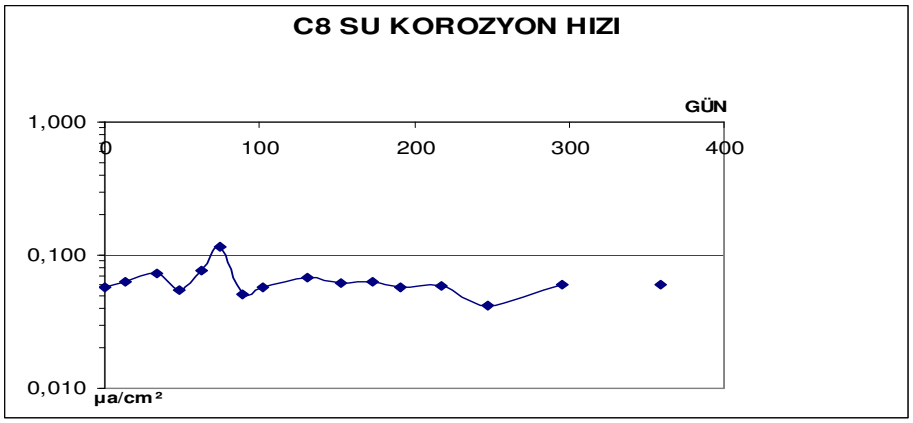
Şekil B.19: Su Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



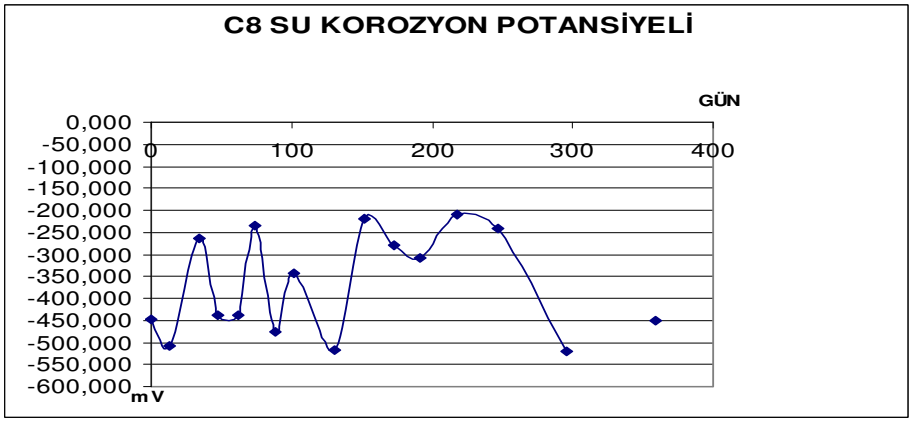
Şekil B.20: Su Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



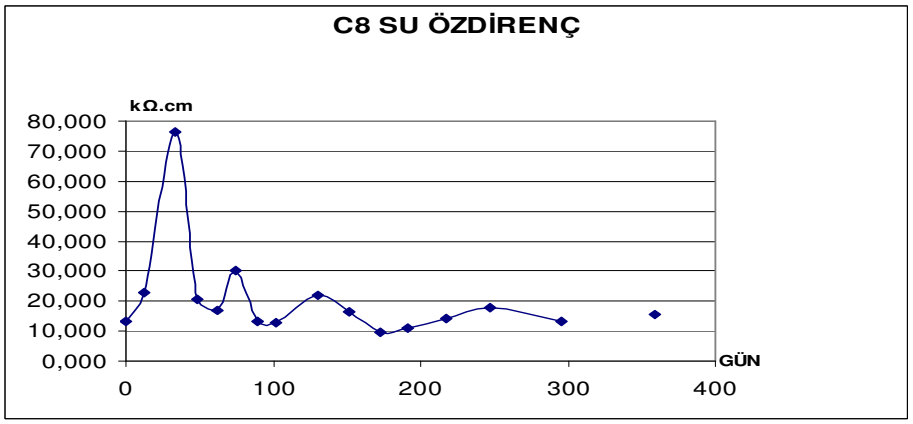
Şekil B.21: Su Kürü Uygulanmış C7 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



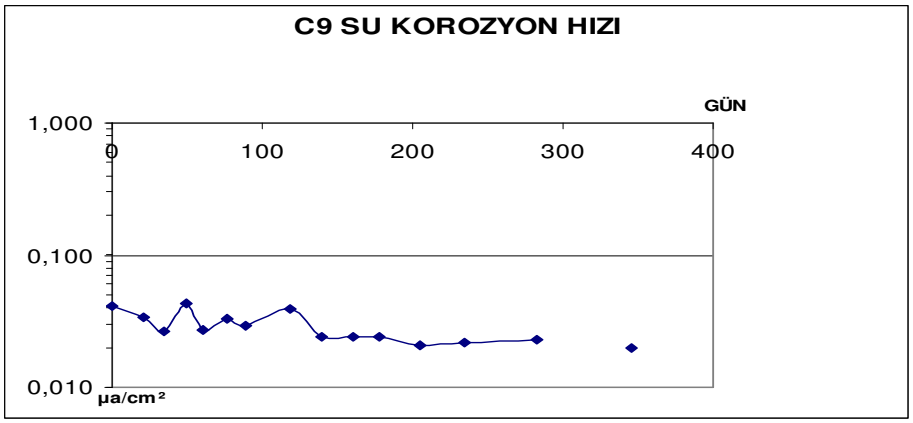
Şekil B.22: Su Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



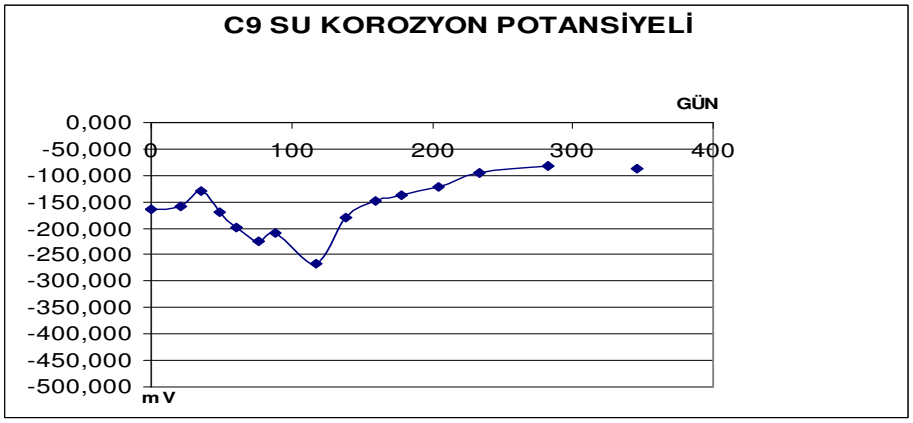
Şekil B.23: Su Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



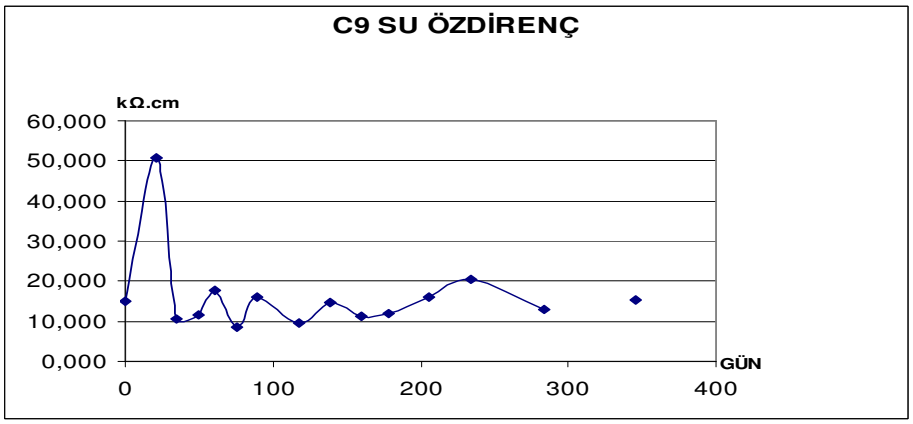
Şekil B.24: Su Kürü Uygulanmış C8 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



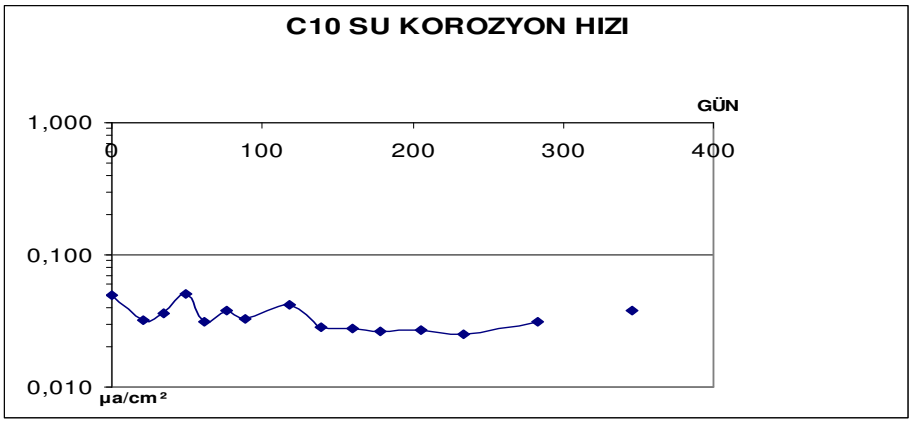
Şekil B.25: Su Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



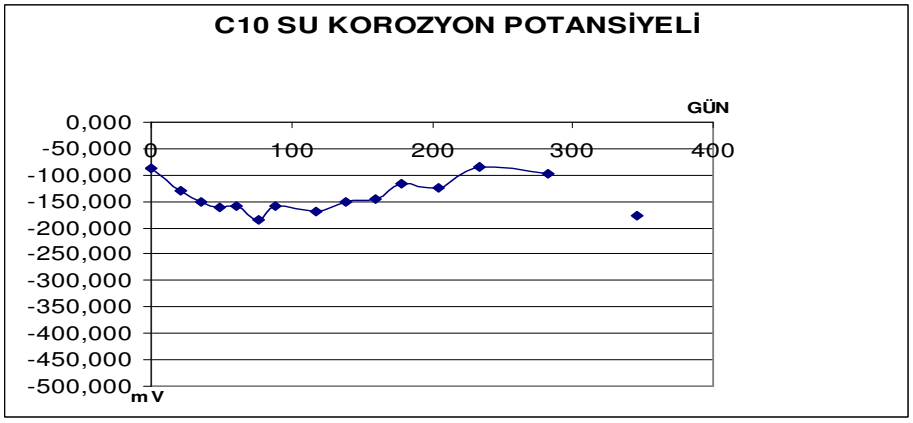
Şekil B.26: Su Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



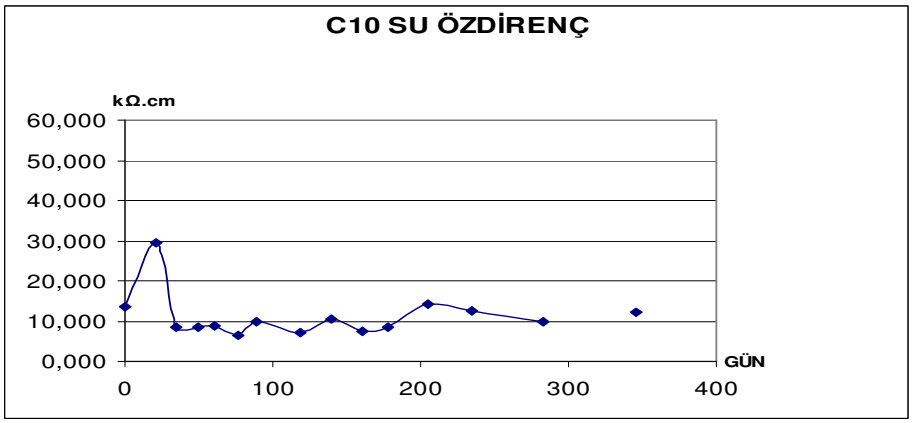
Şekil B.27: Su Kürü Uygulanmış C9 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



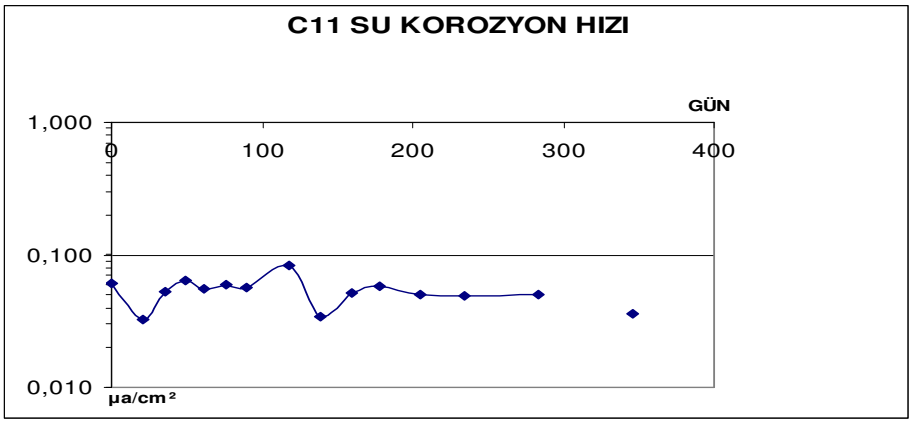
Şekil B.28: Su Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



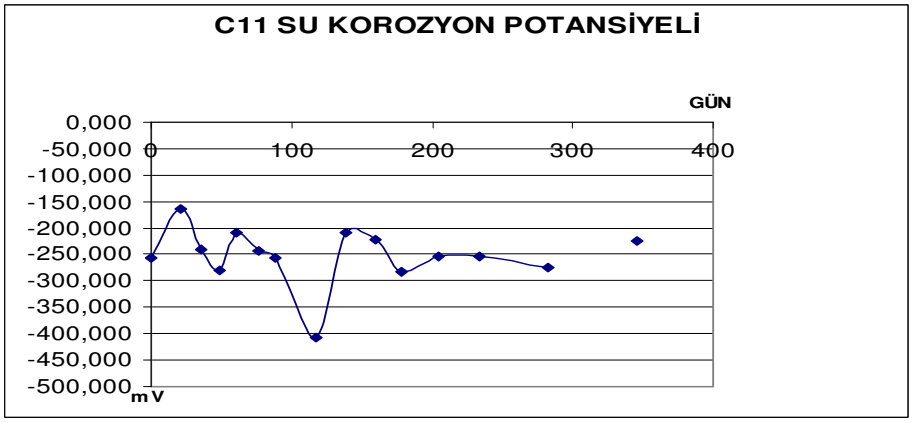
Şekil B.29: Su Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



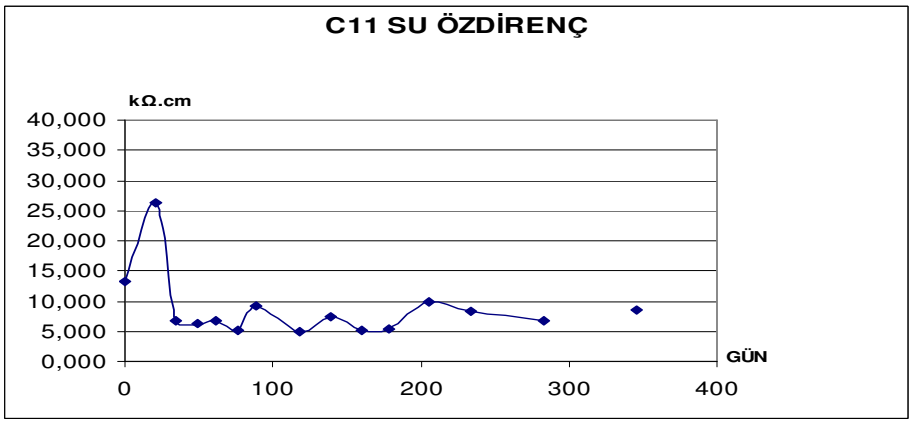
Şekil B.30: Su Kürü Uygulanmış C10 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



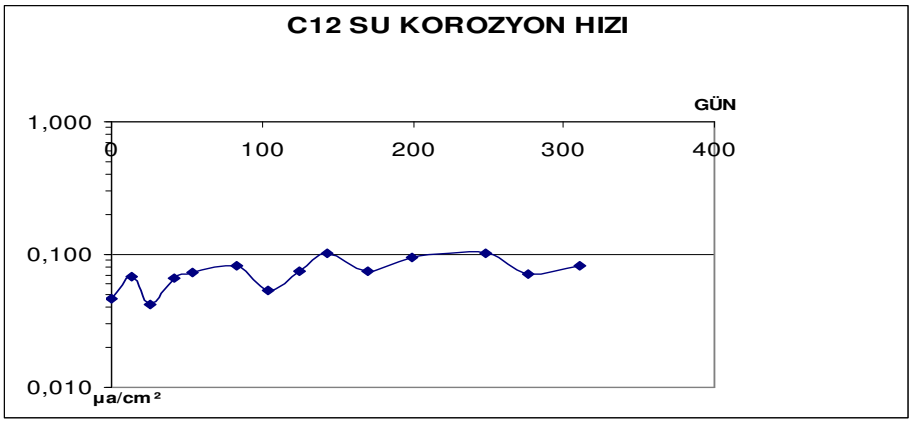
Şekil B.31: Su Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



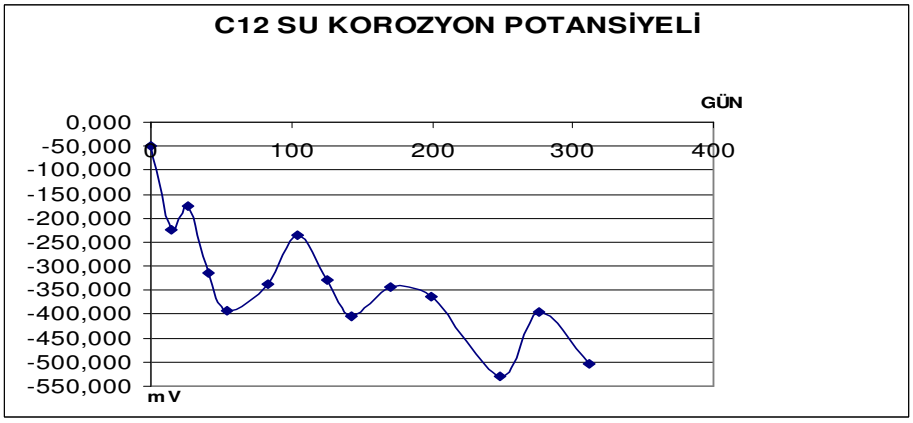
Şekil B.32: Su Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



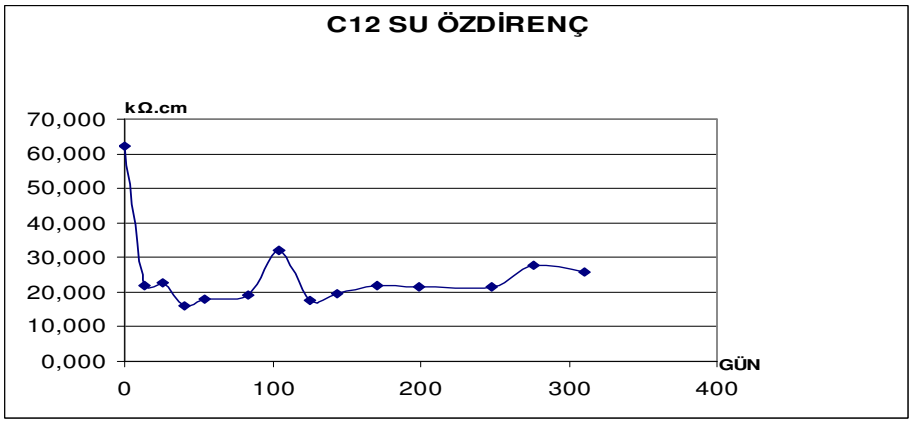
Şekil B.33: Su Kürü Uygulanmış C11 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



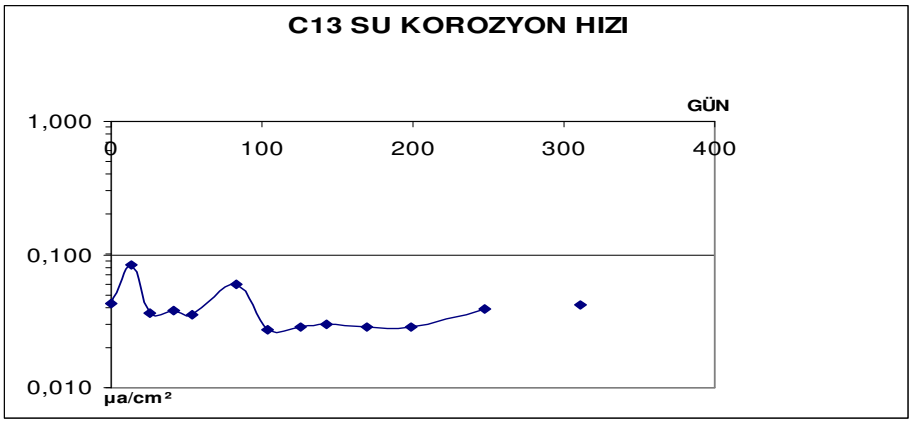
Şekil B.34: Su Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



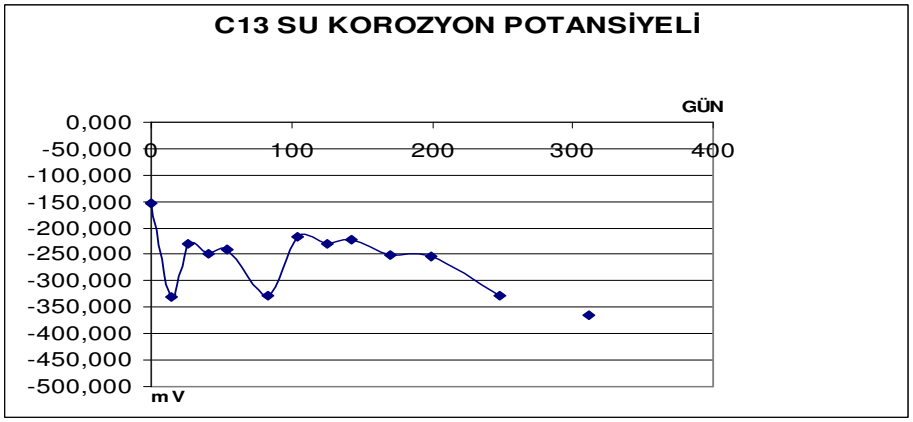
Şekil B.35: Su Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



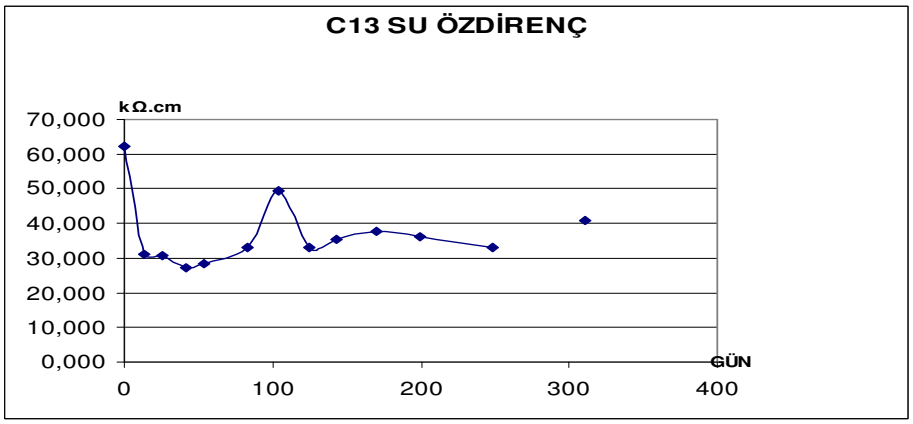
Şekil B.36: Su Kürü Uygulanmış C12 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



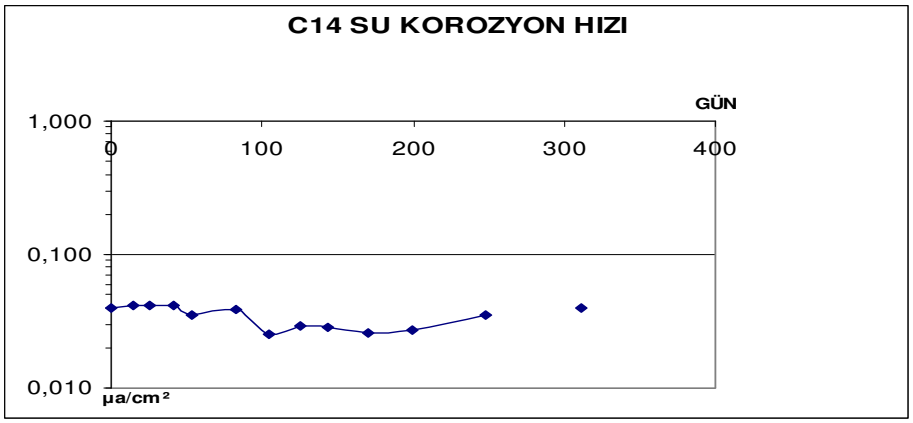
Şekil B.37: Su Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



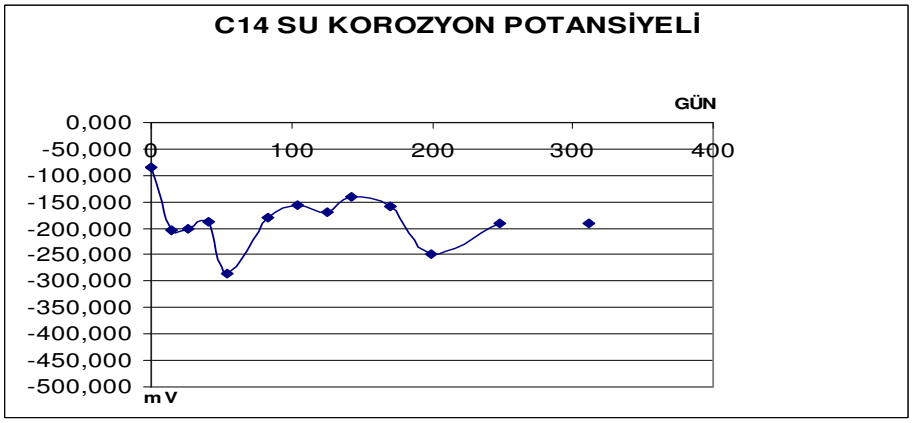
Şekil B.38: Su Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



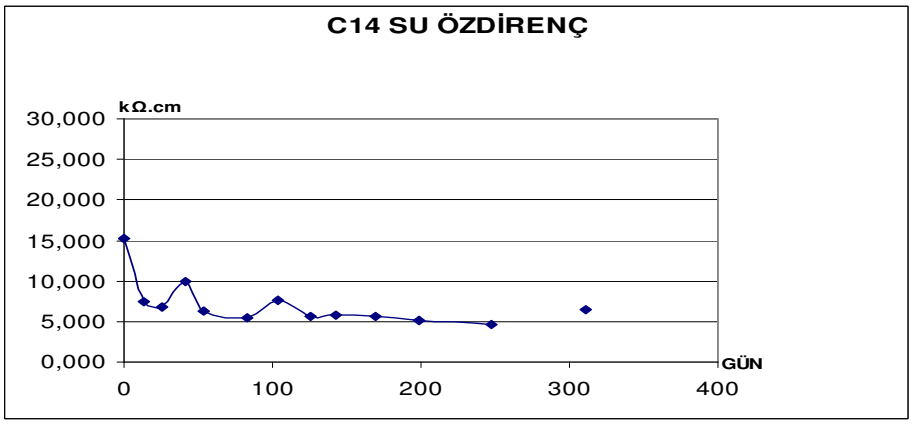
Şekil B.39: Su Kürü Uygulanmış C13 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



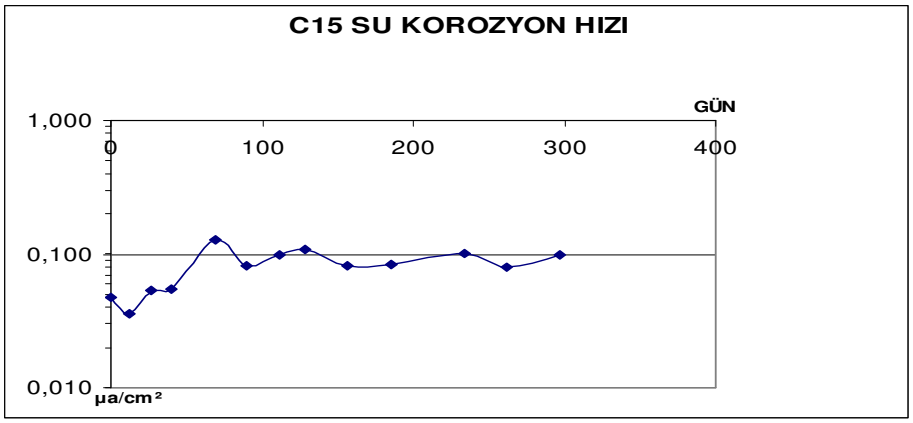
Şekil B.40: Su Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



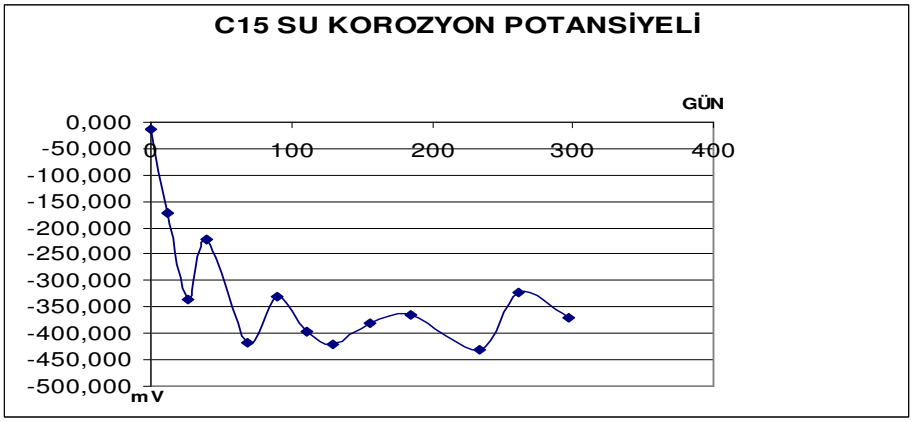
Şekil B.41: Su Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



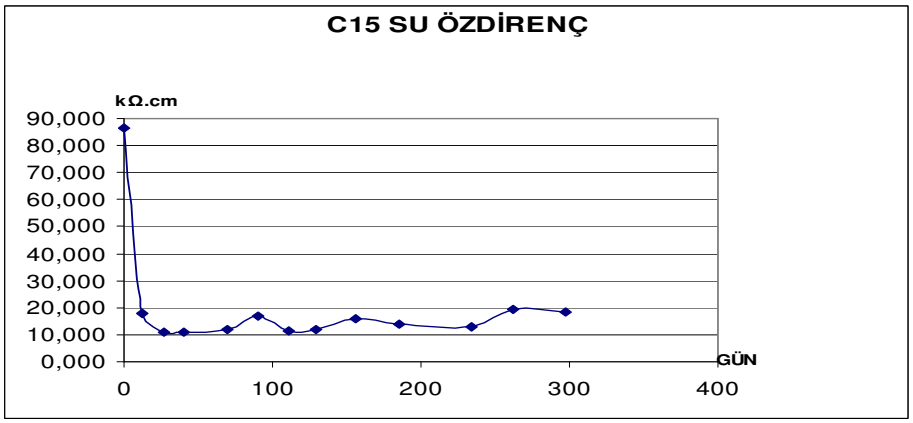
Şekil B.42: Su Kürü Uygulanmış C14 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



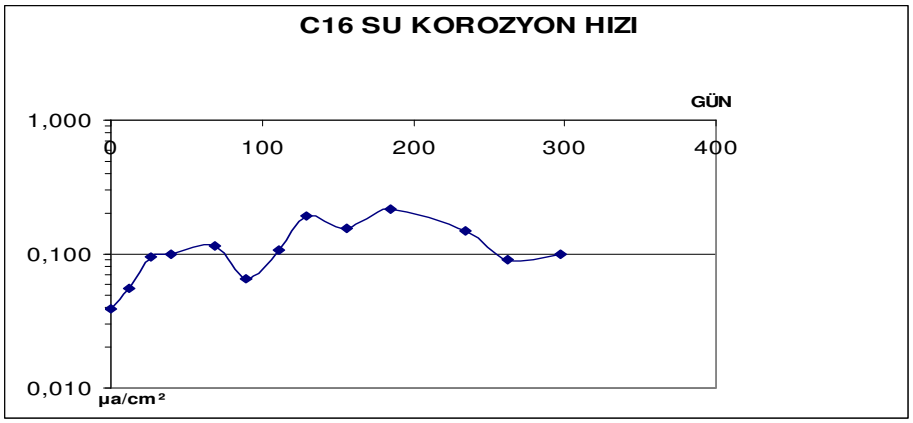
Şekil B.43: Su Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



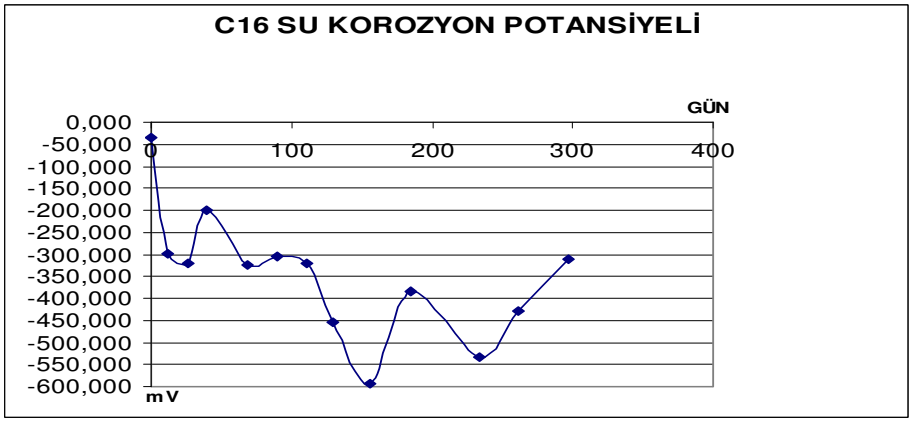
Şekil B.44: Su Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



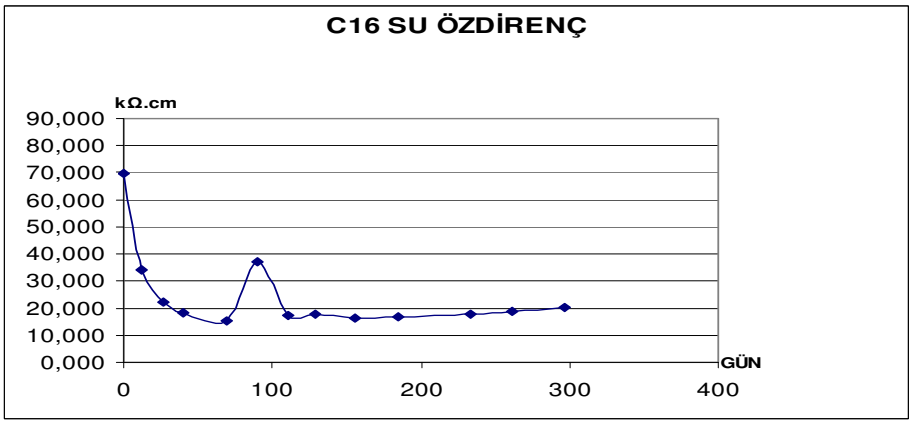
Şekil B.45: Su Kürü Uygulanmış C15 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



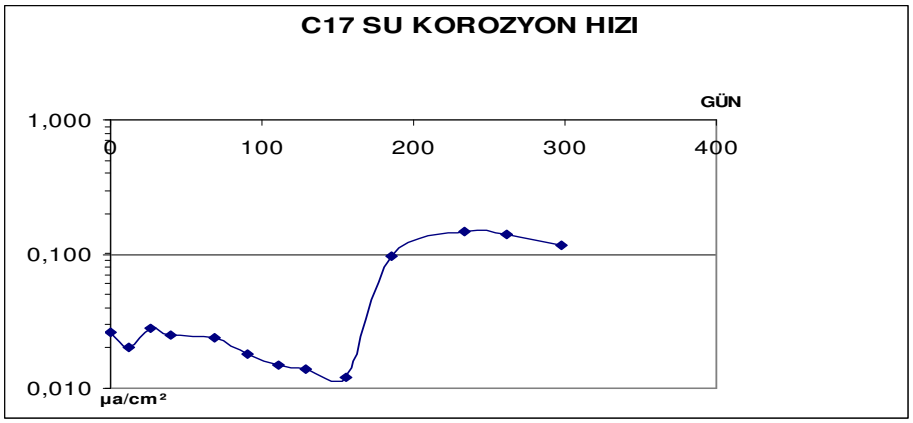
Şekil B.46: Su Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



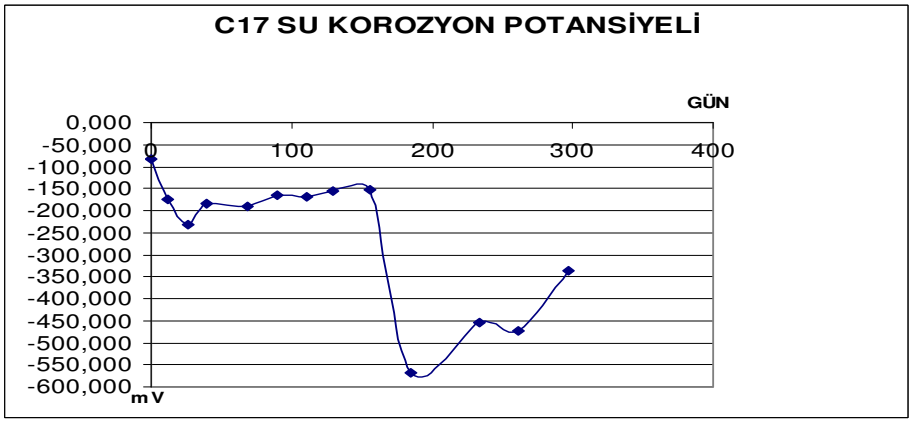
Şekil B.47: Su Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



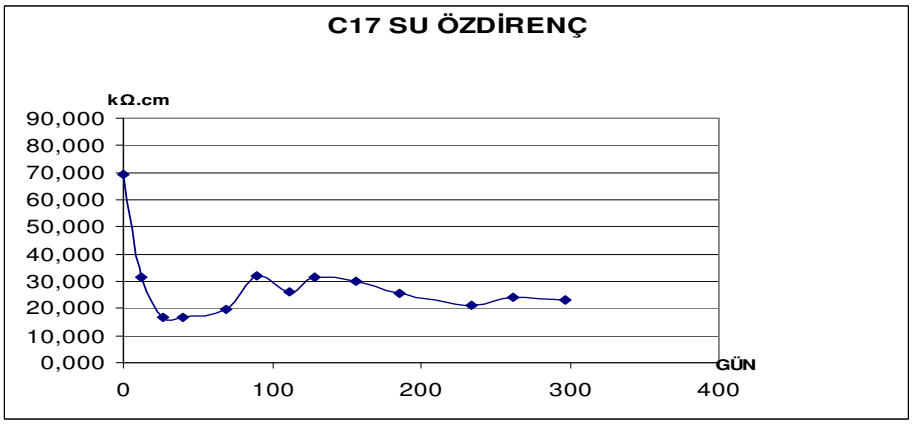
Şekil B.48: Su Kürü Uygulanmış C16 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



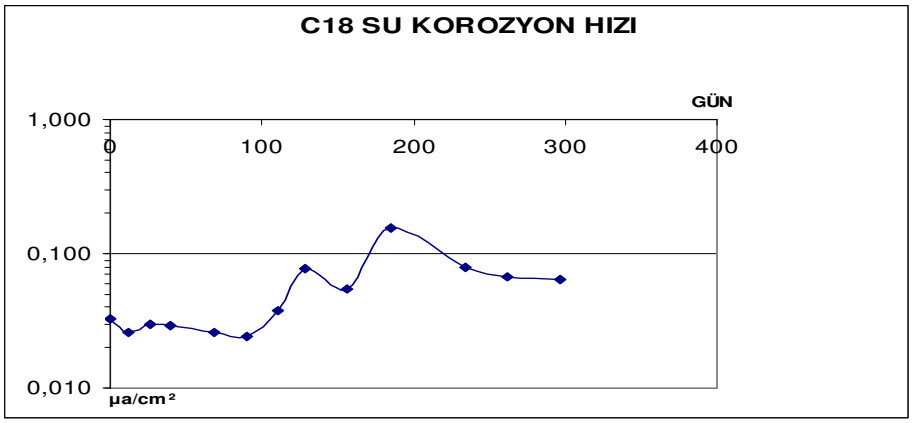
Şekil B.49: Su Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



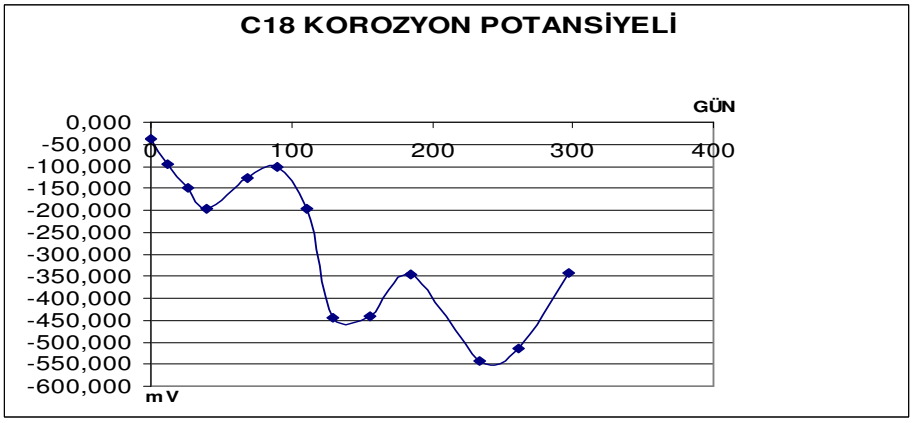
Şekil B.50: Su Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



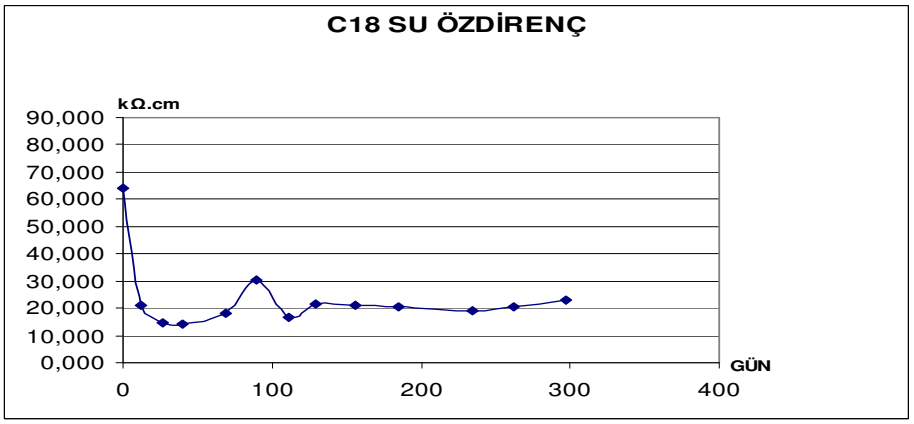
Şekil B.51: Su Kürü Uygulanmış C17 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



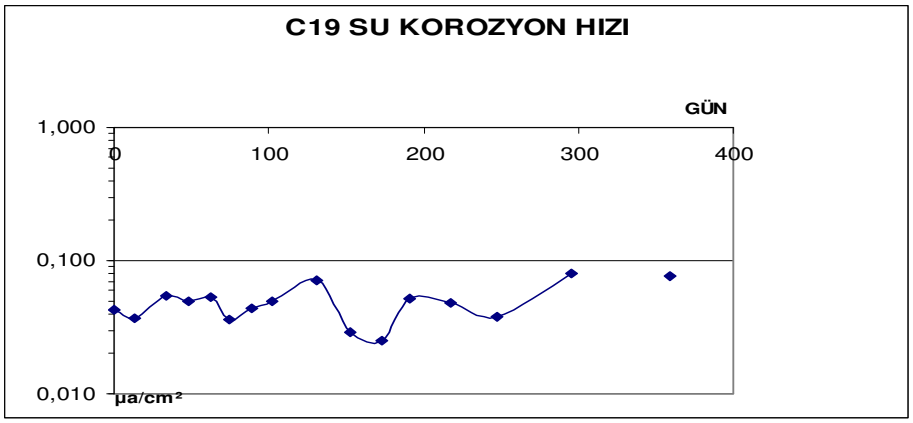
Şekil B.52: Su Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



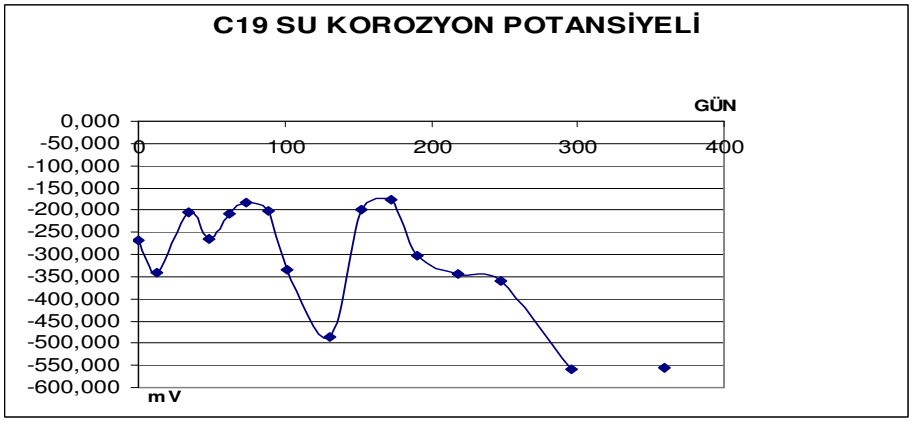
Şekil B.53: Su Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



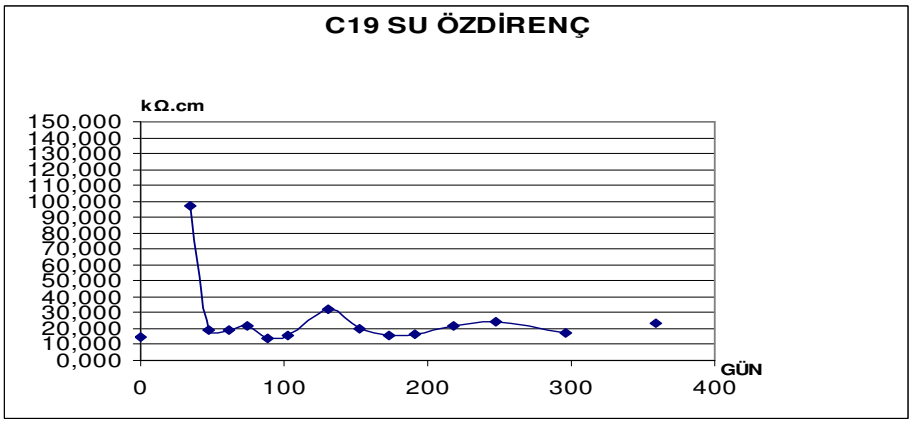
Şekil B.54: Su Kürü Uygulanmış C18 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



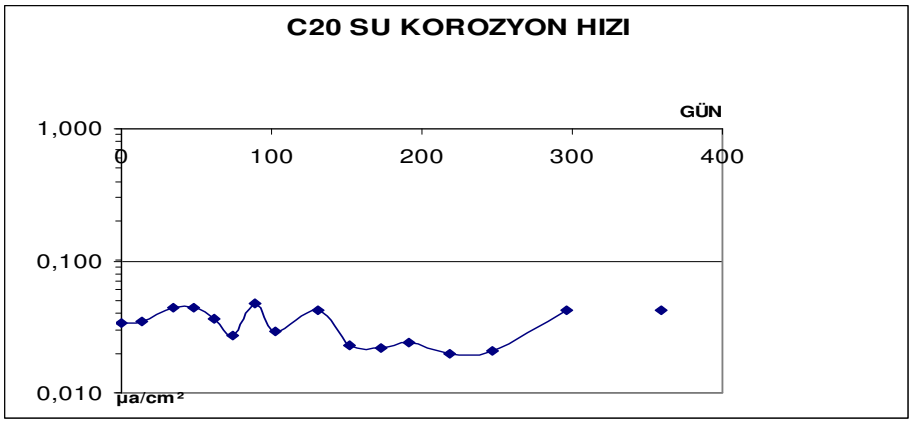
Şekil B.55: Su Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi



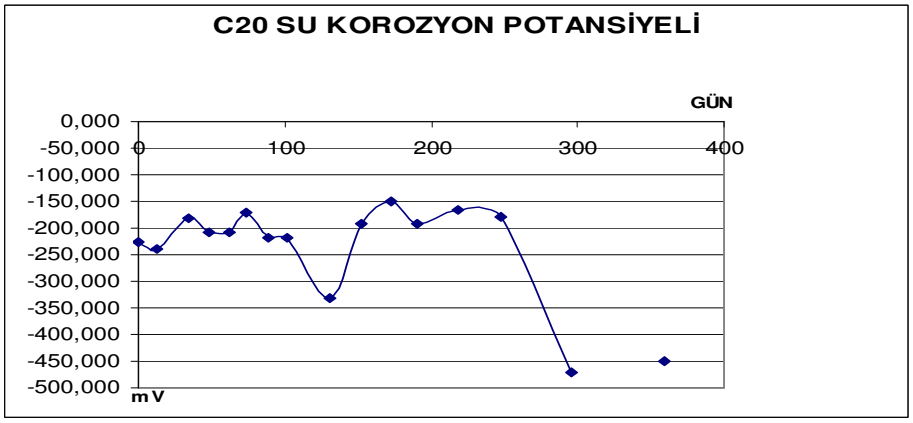
Şekil B.56: Su Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi



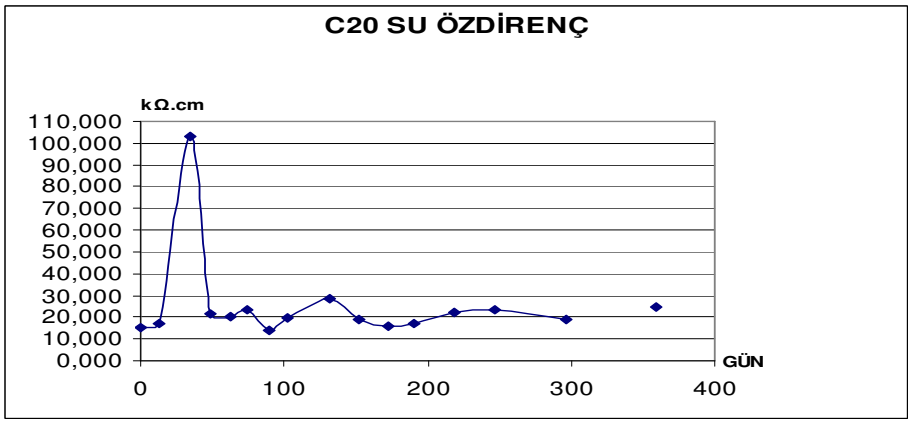
Şekil B.57: Su Kürü Uygulanmış C19 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi



Şekil B.58: Su Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Hızı-Zaman İlişkisi

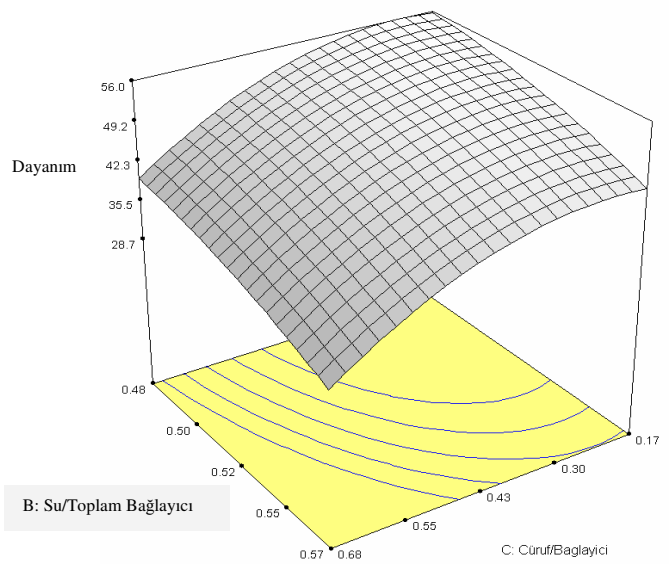


Şekil B.59: Su Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Korozyon Potansiyeli-Zaman İlişkisi

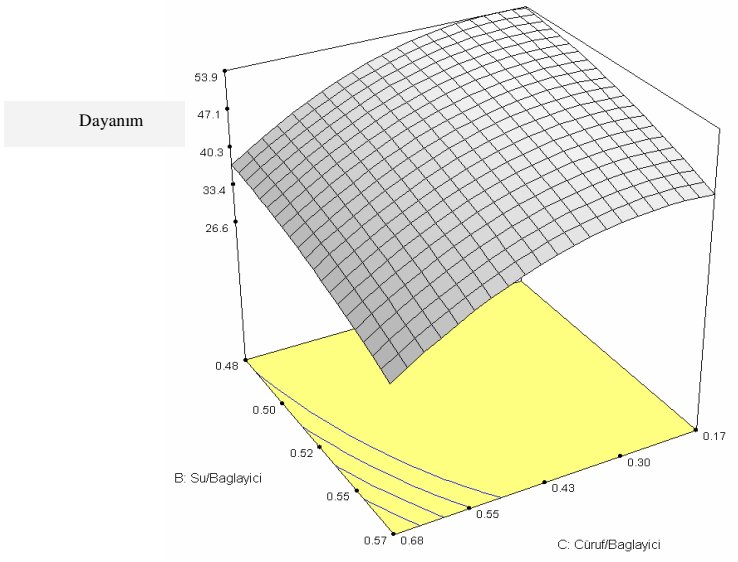


Şekil B.60: Su Kürü Uygulanmış C20 Numunelerinin Özdirenç-Zaman İlişkisi

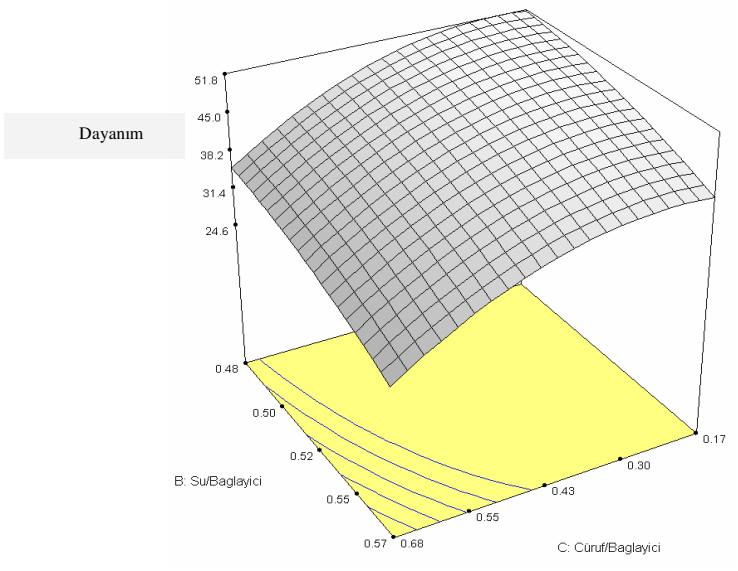
EK – C HAVA KÜRÜ NUMUNELERİNE AİT BASINÇ DAYANIMI, HIZLI KLORÜR GEÇİRİMLİLİĞİ ve KILCAL SU EMME SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN GRAFİKLER



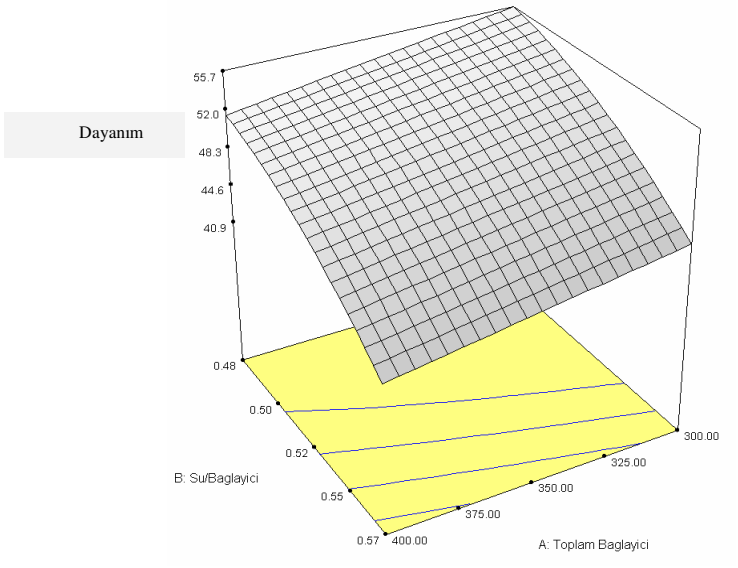
Şekil C.1: Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



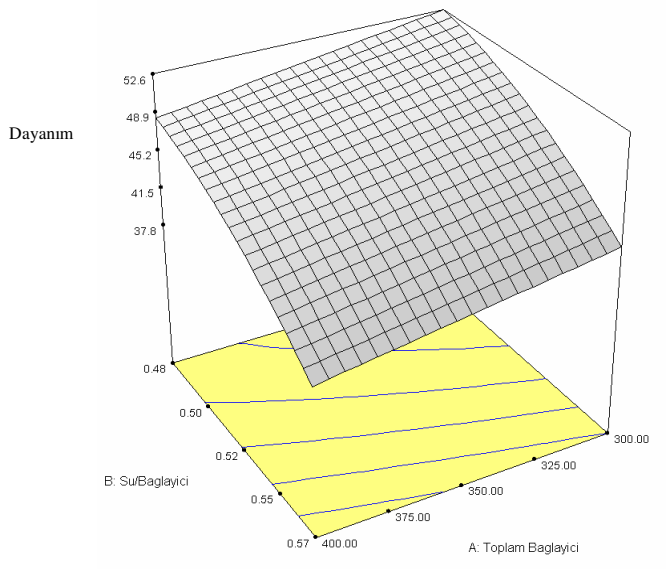
Şekil C.2: Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



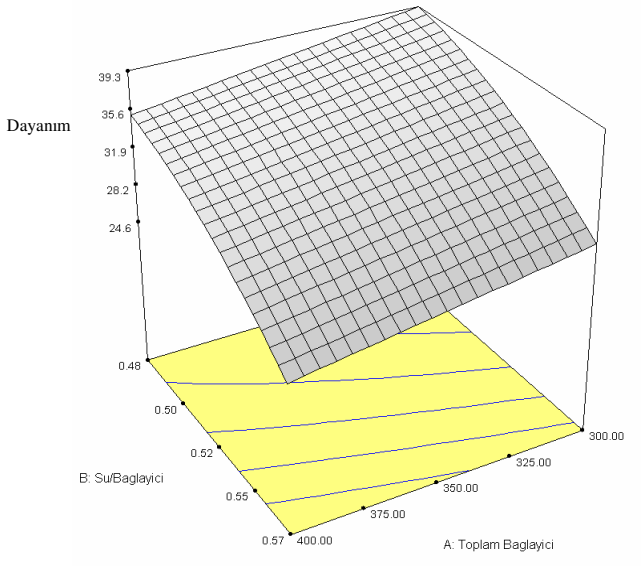
Şekil C.3: Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



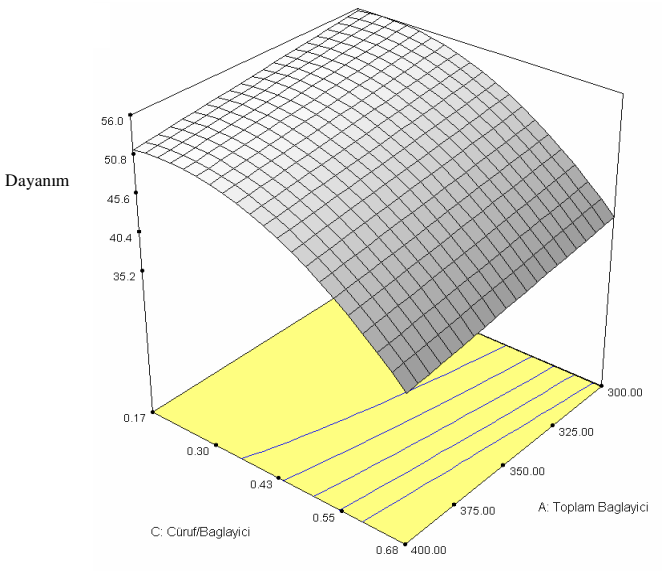
Şekil C.4: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



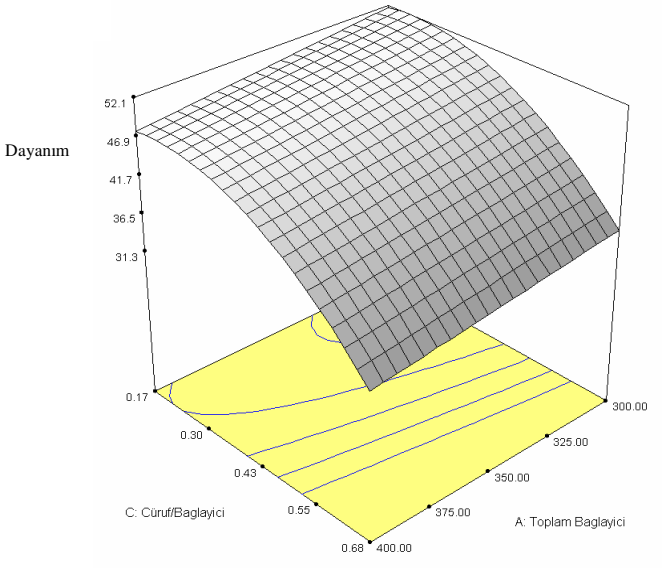
Şekil C.5: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



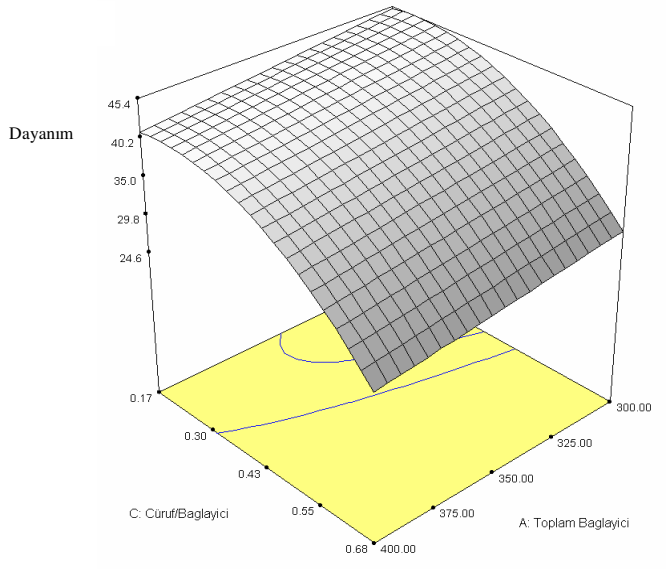
Şekil C.6: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



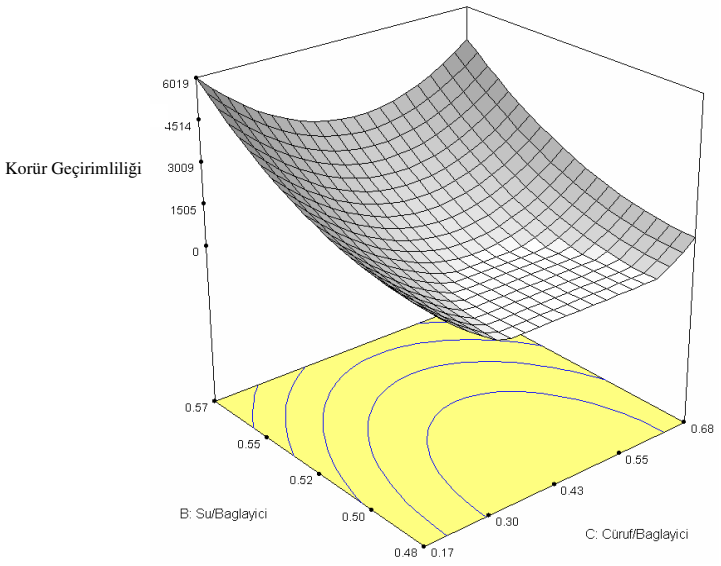
Şekil C.7: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



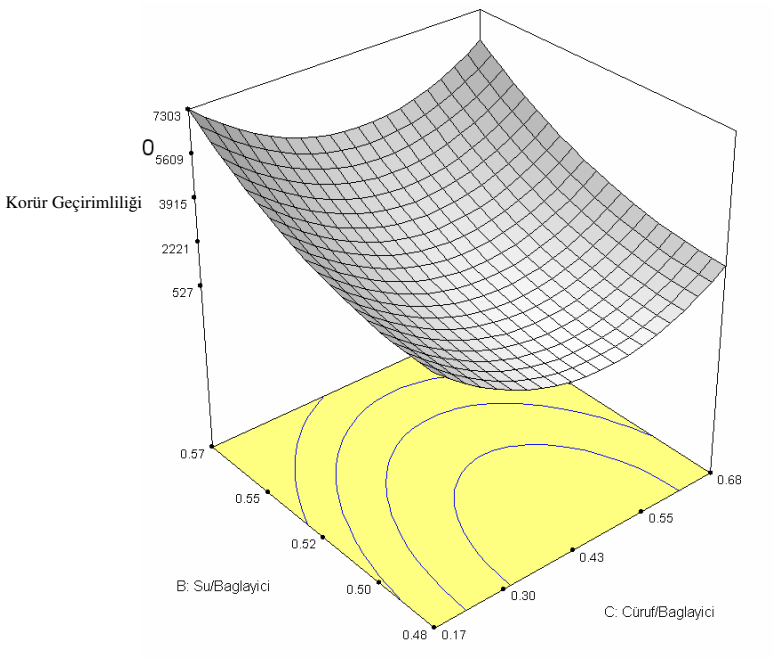
Şekil C.8: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



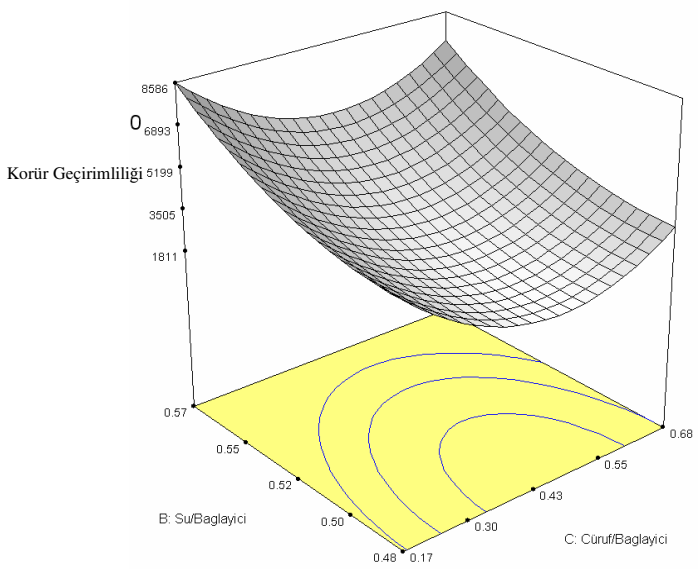
Şekil C.9: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



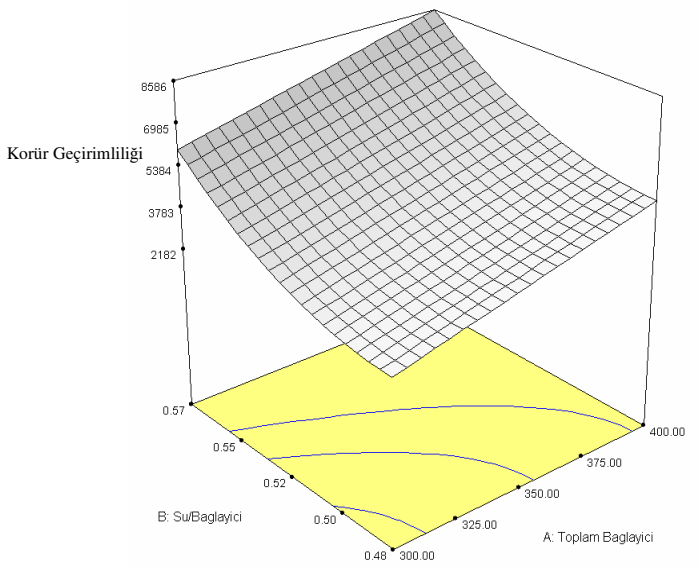
Şekil C.10: Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



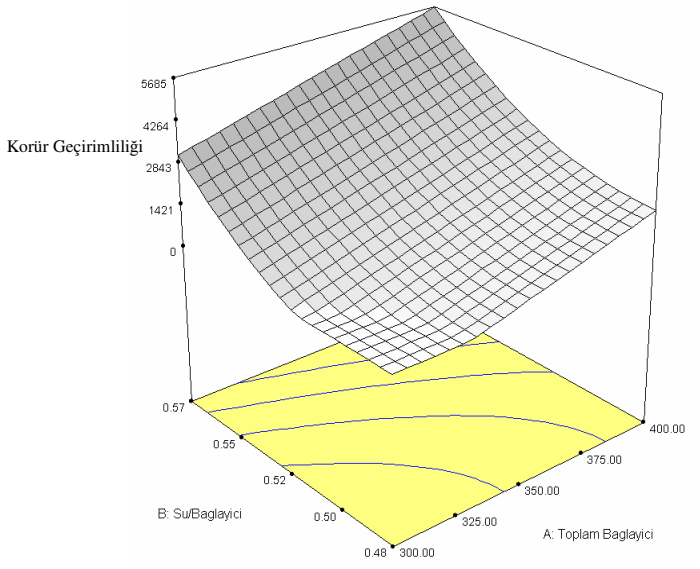
Şekil C.11: Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



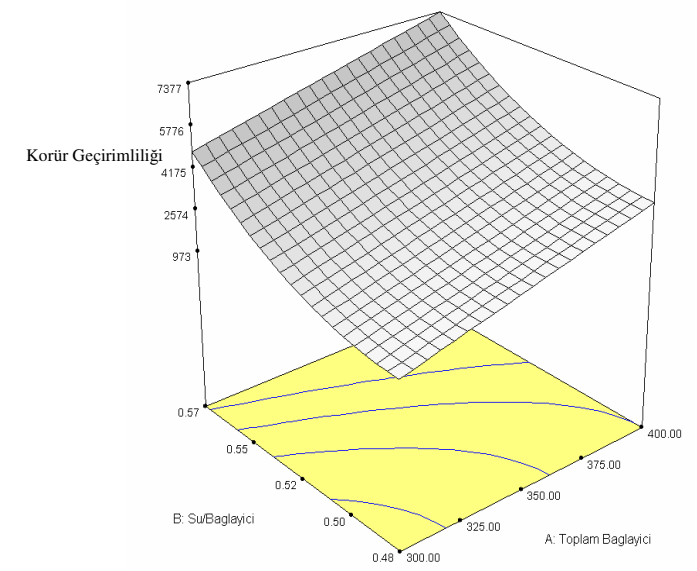
Şekil C.12: Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



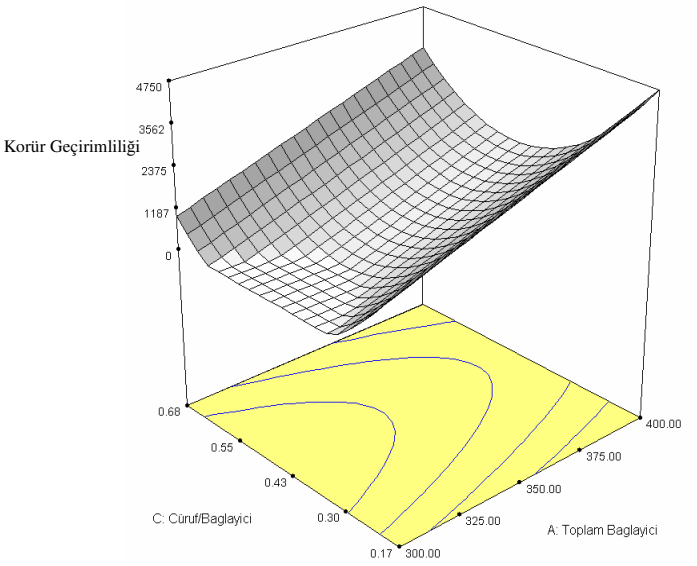
Şekil C.13: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



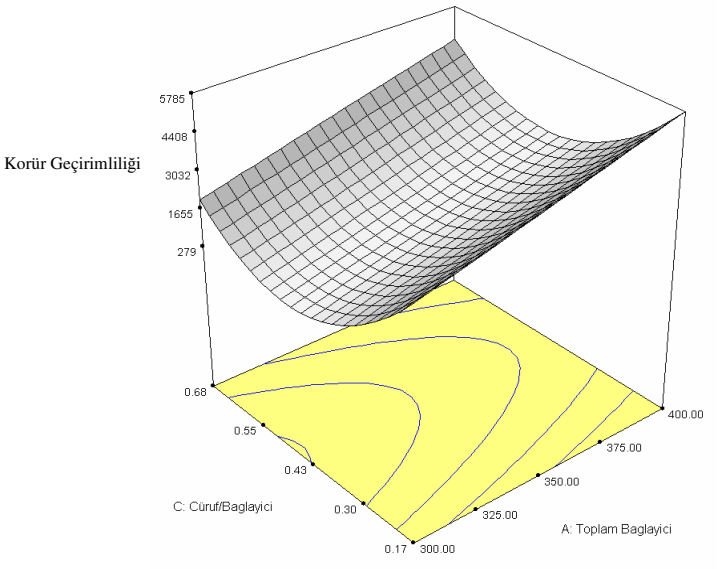
Şekil C.14: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



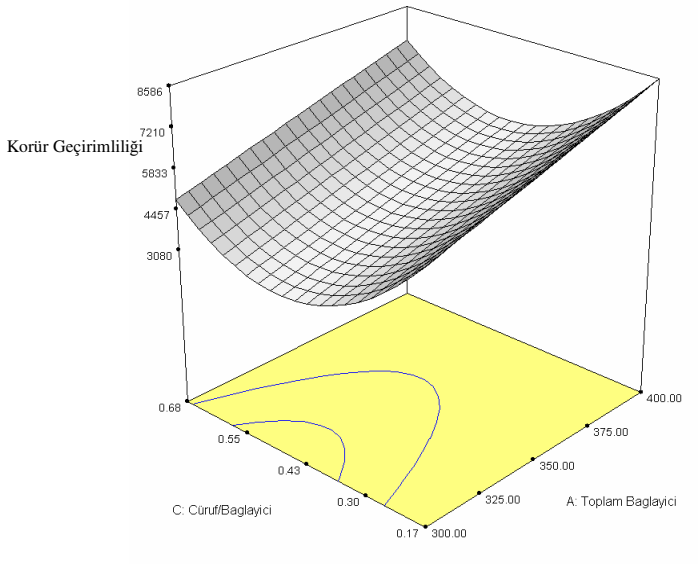
Şekil C.15: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



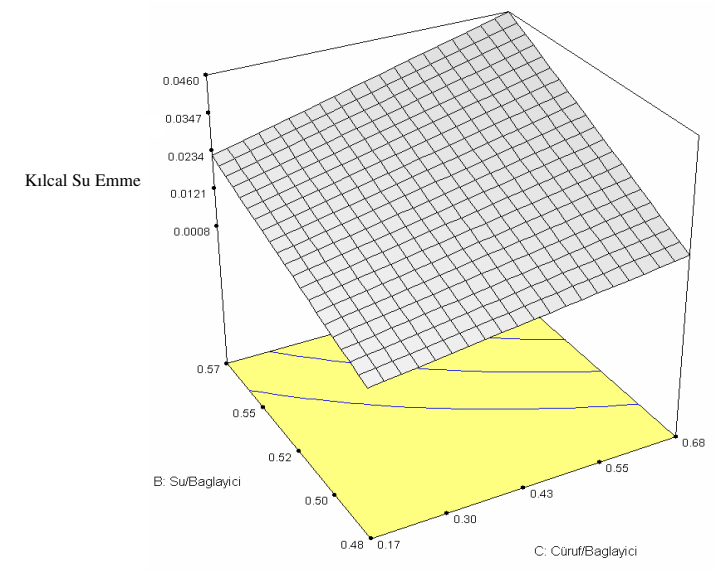
Şekil C.16: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



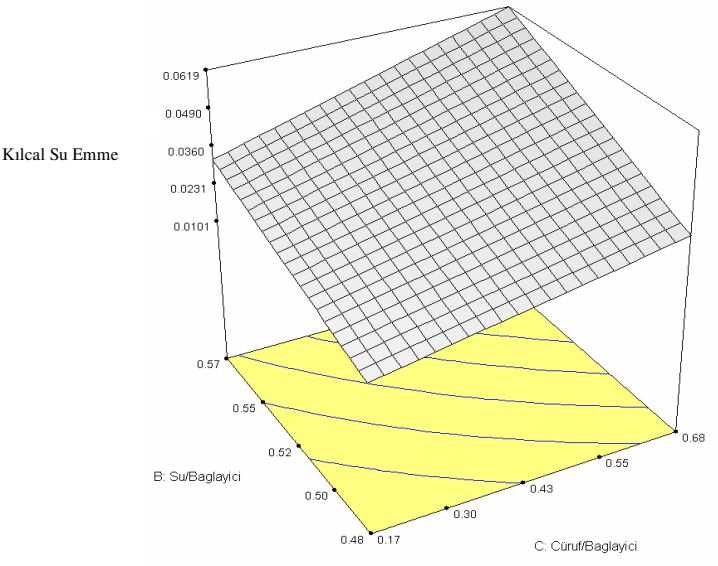
Şekil C.17: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



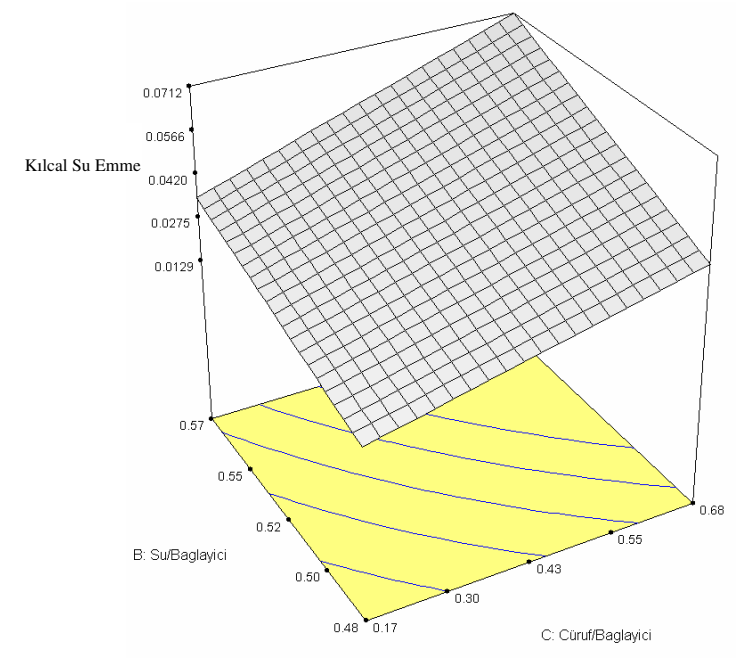
Şekil C.18: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



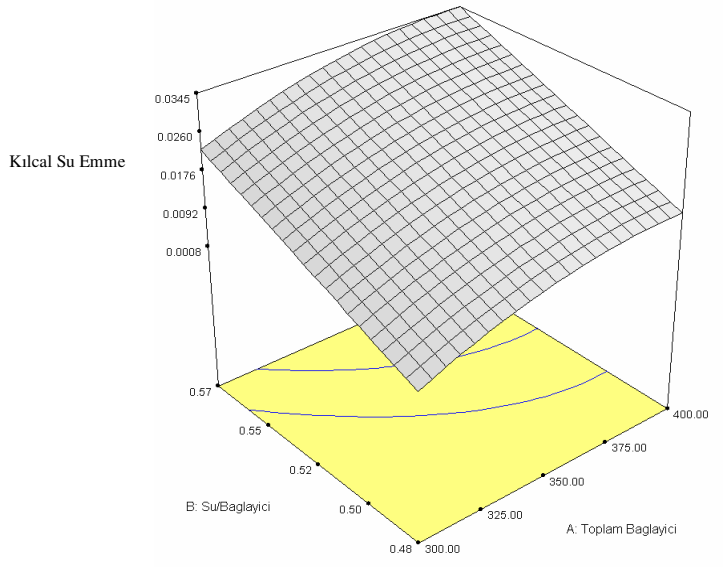
Şekil C.19: Hava Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



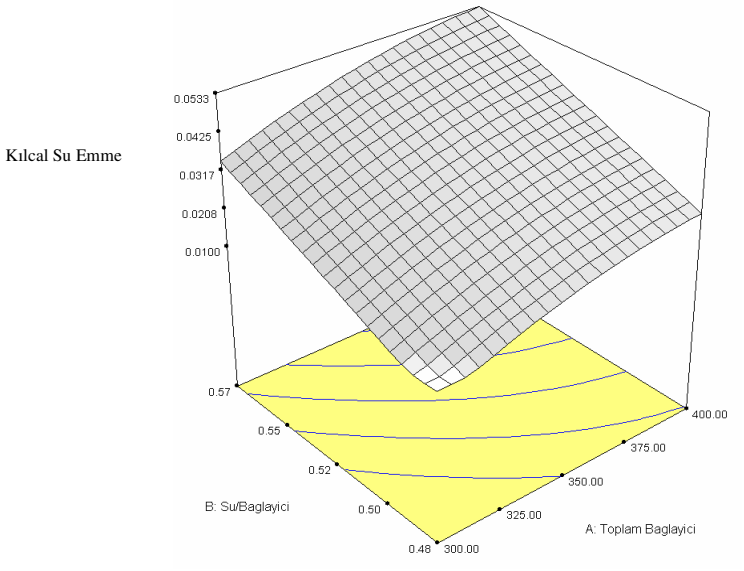
Şekil C.20: Hava Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



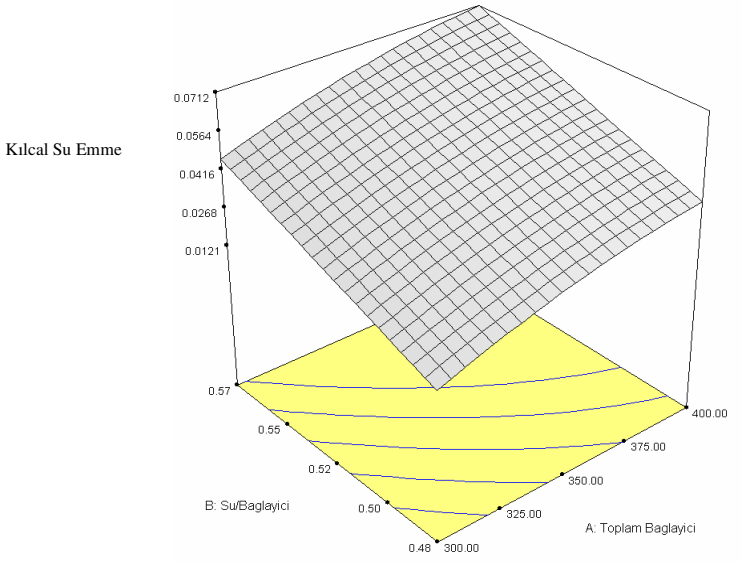
Şekil C.21: Hava Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



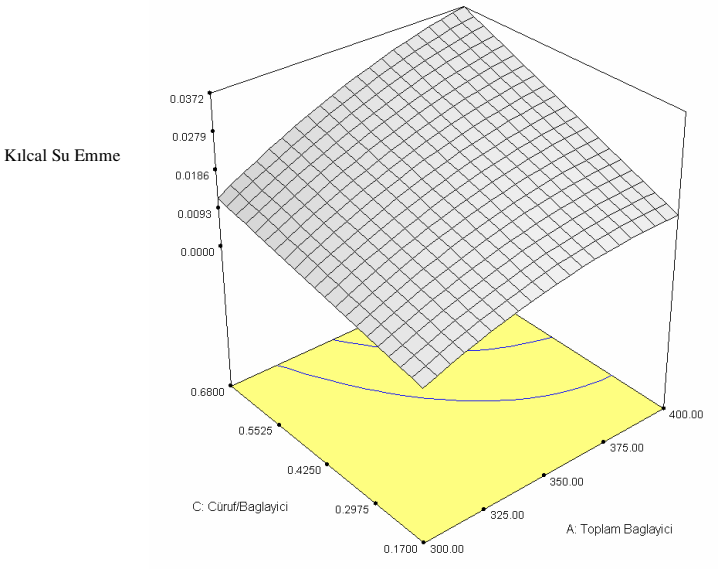
Şekil C.22: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



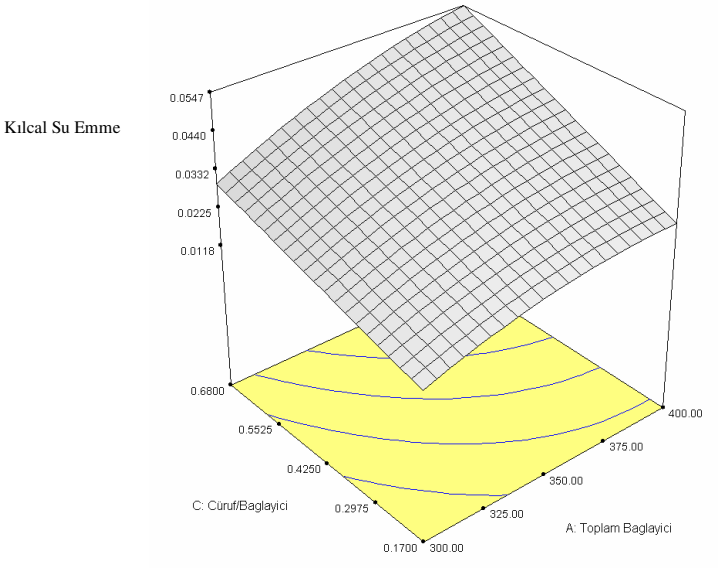
Şekil C.23: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



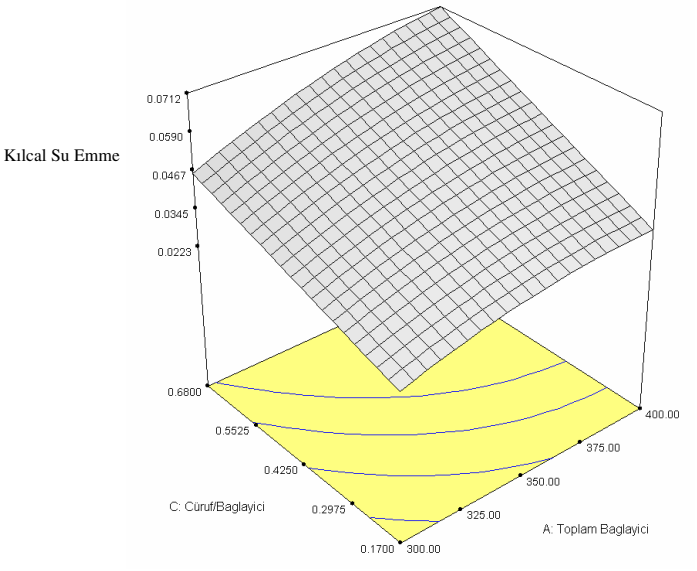
Şekil C.24: Hava Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



Şekil C.25: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi

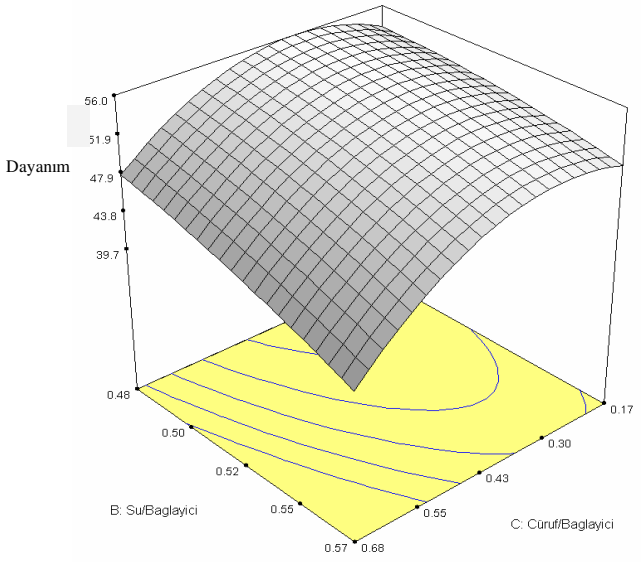


Şekil C.26: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi

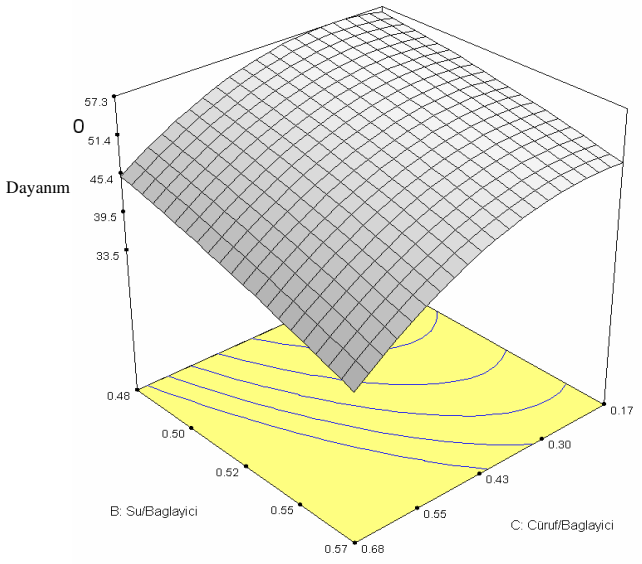


Şekil C.27: Hava Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi

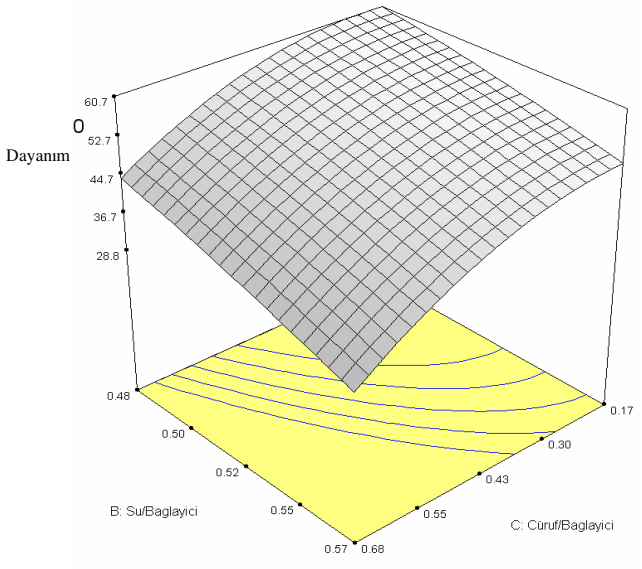
EK – D SU KÜRÜ NUMUNELERİNE AİT BASINÇ DAYANIMI, HIZLI KLORÜR GEÇİRİMLİLİĞİ ve KILCAL SU EMME SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN GRAFİKLER



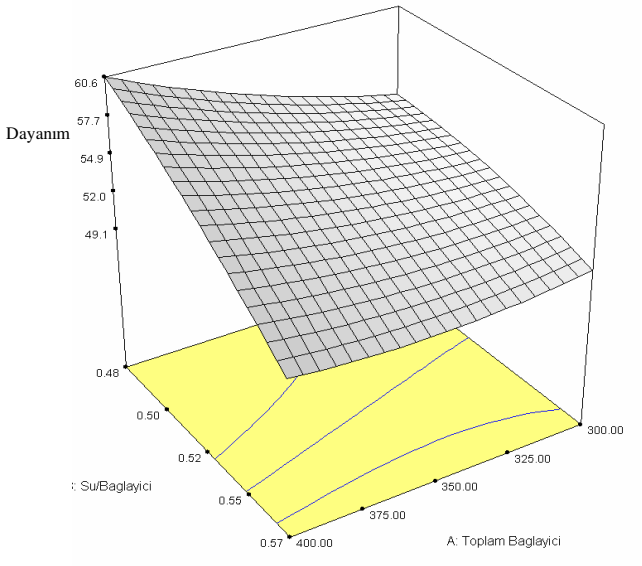
Şekil D.1: Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



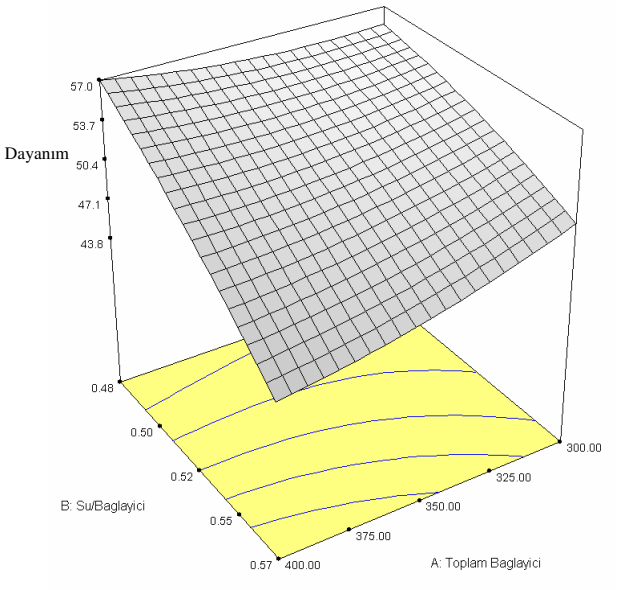
Şekil D.2: Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



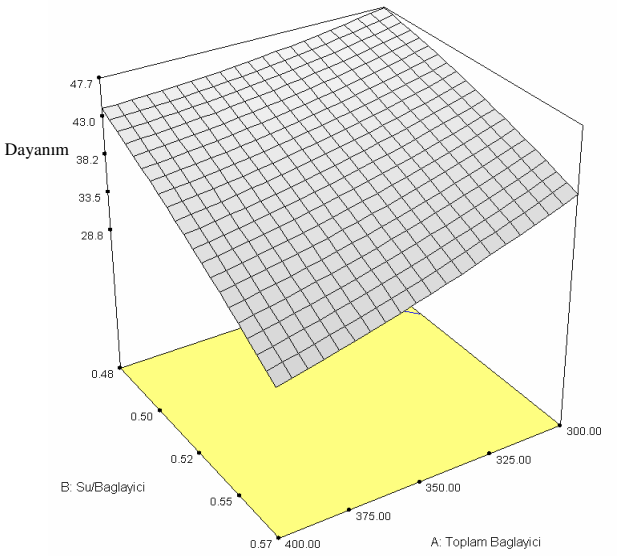
Şekil D.3: Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



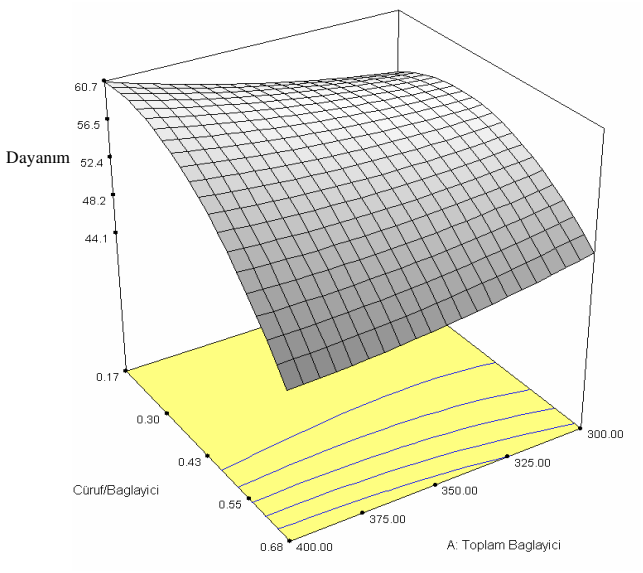
Şekil D.4: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



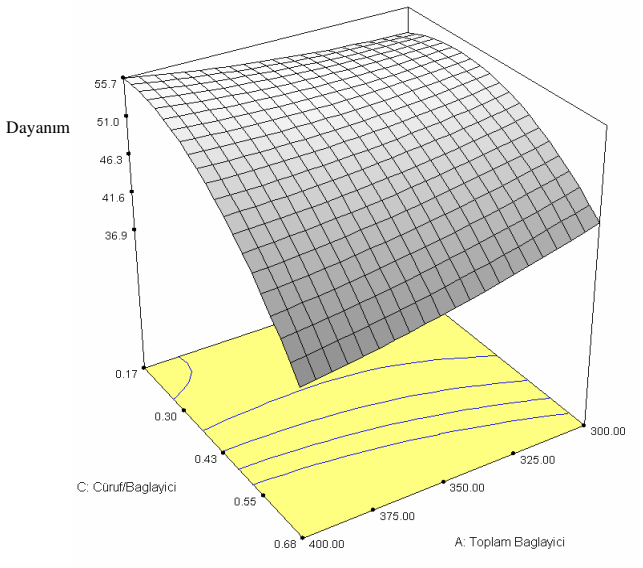
Şekil D.5: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



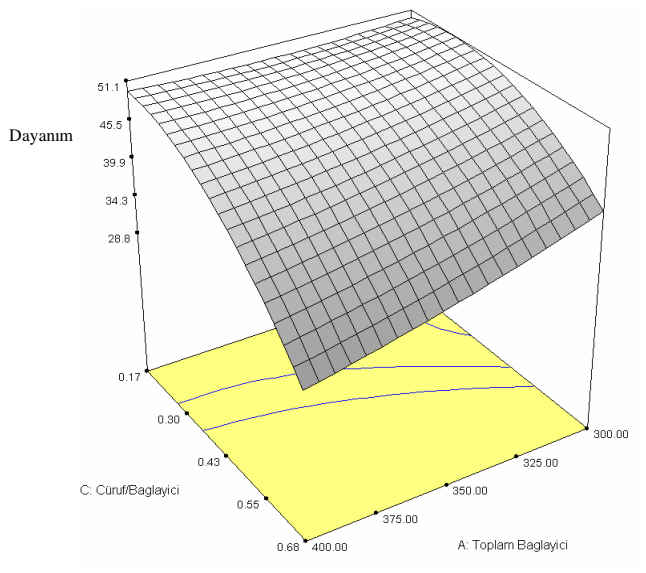
Şekil D.6: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



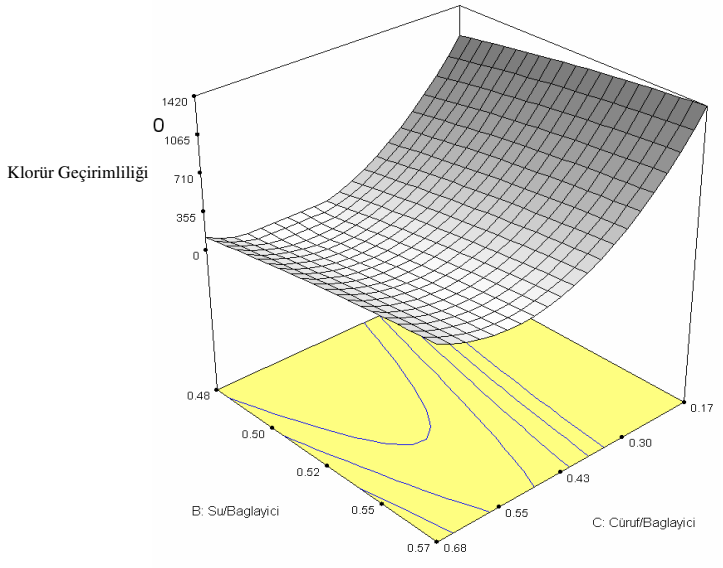
Şekil D.7: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



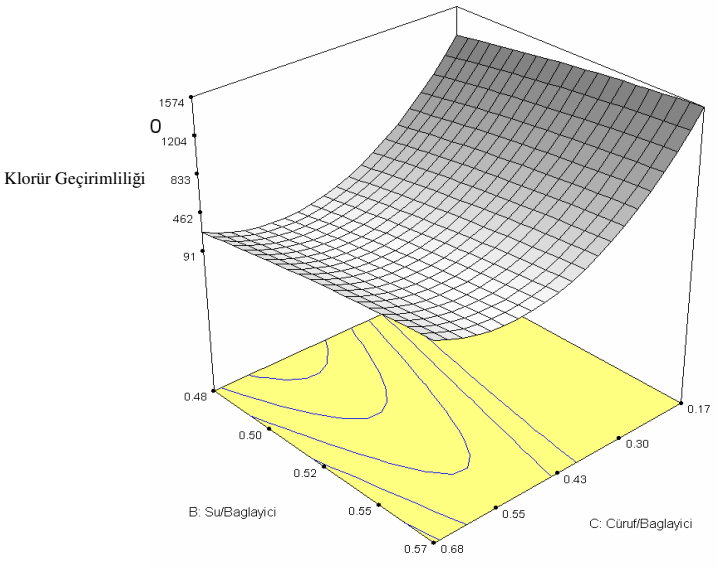
Şekil D.8: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



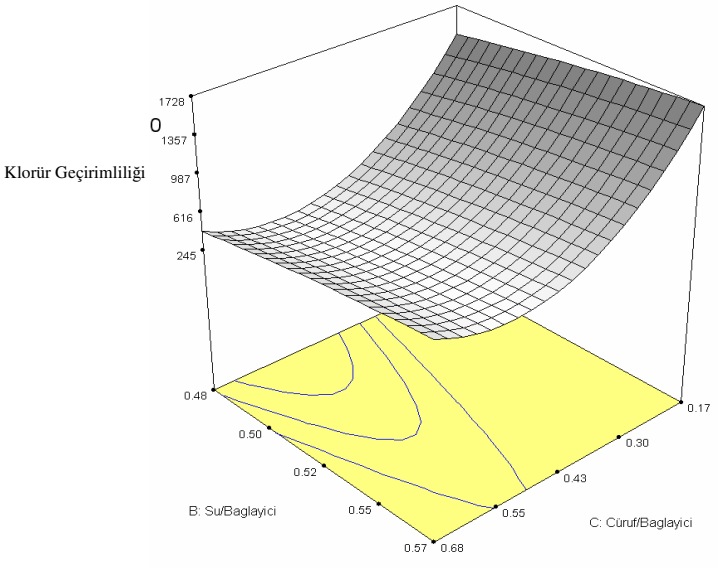
Şekil D.9: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Basınç Dayanımı Analizi



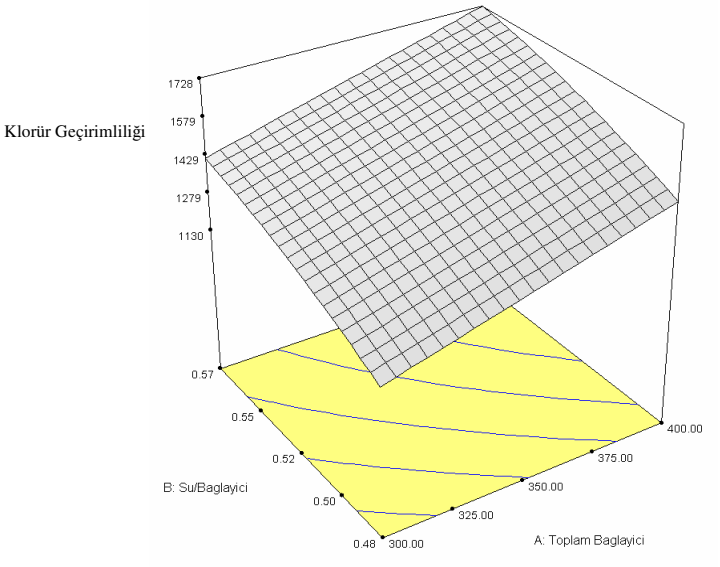
Şekil D.10: Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



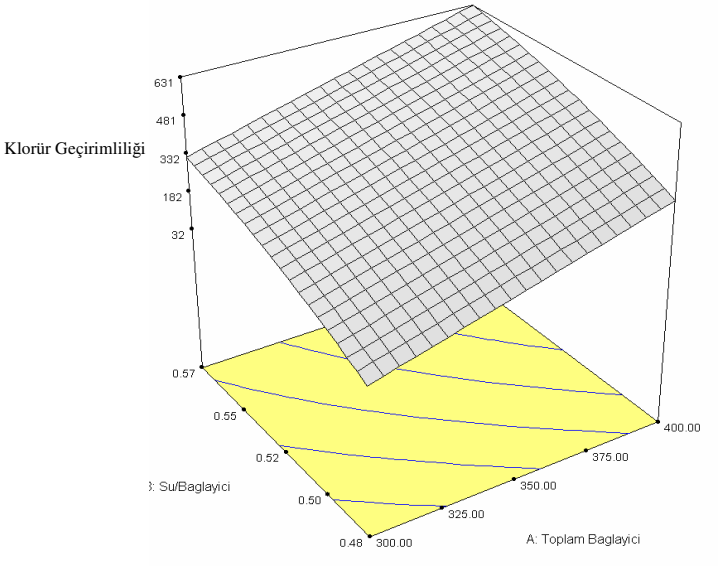
Şekil D.11: Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



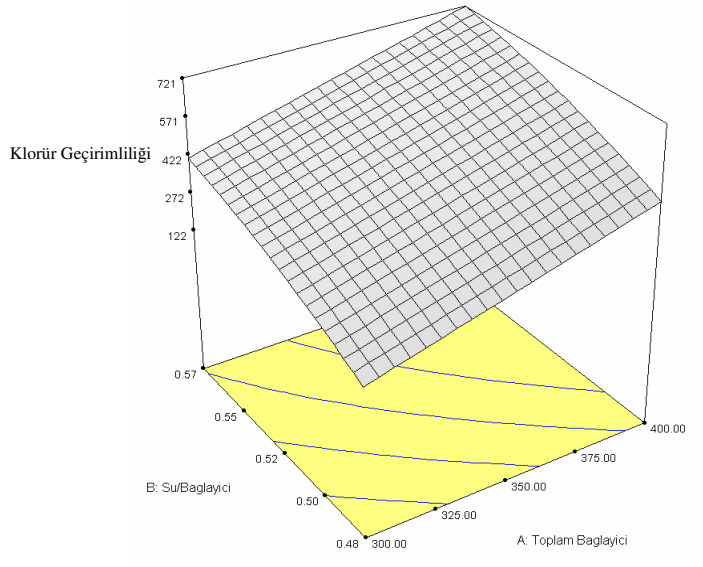
Şekil D.12: Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



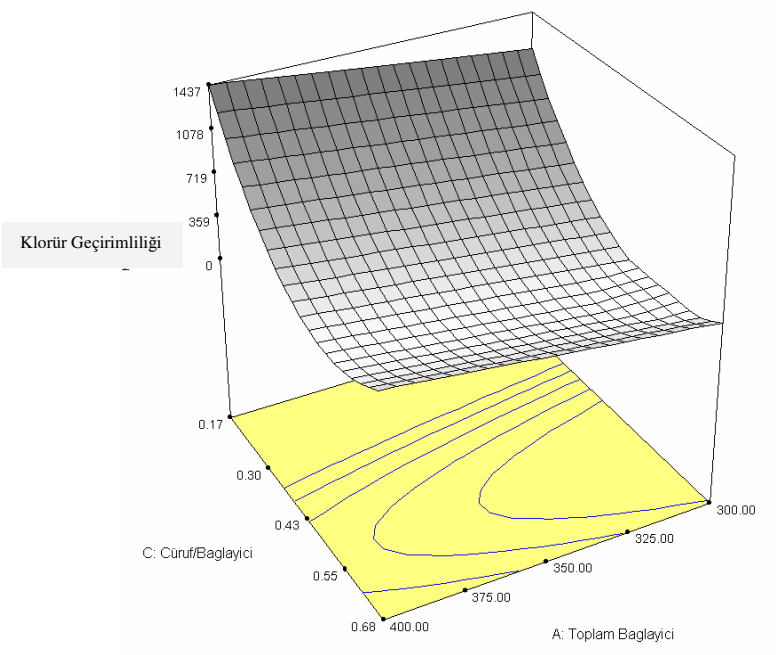
Şekil D.13: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



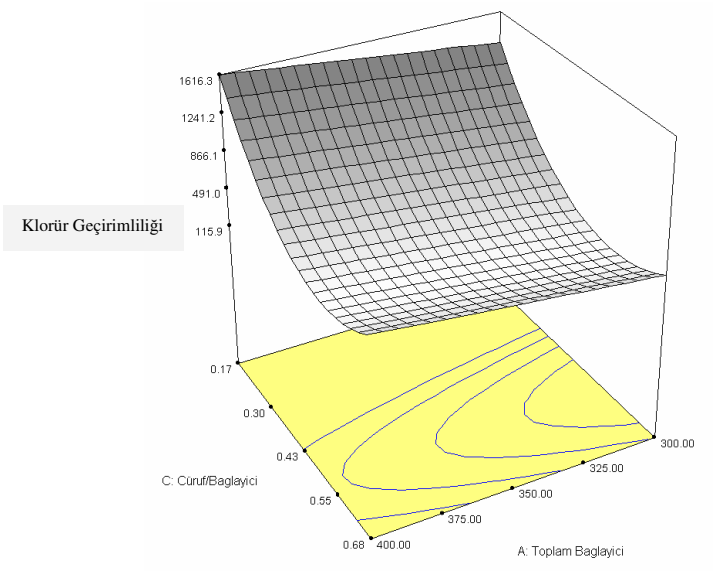
Şekil D.14: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



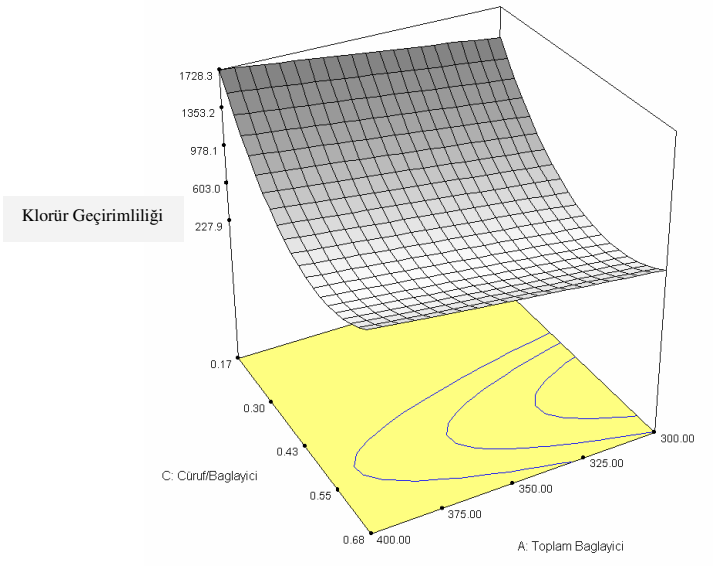
Şekil D.15: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



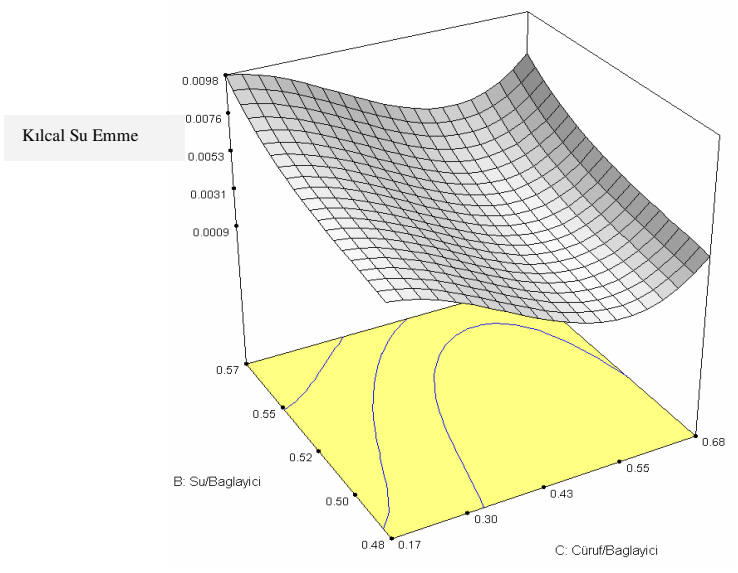
Şekil D.16: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



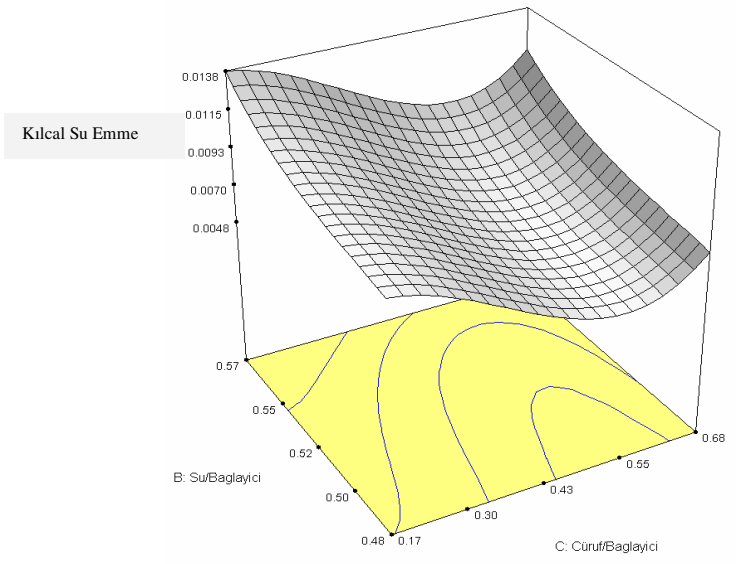
Şekil D.17: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



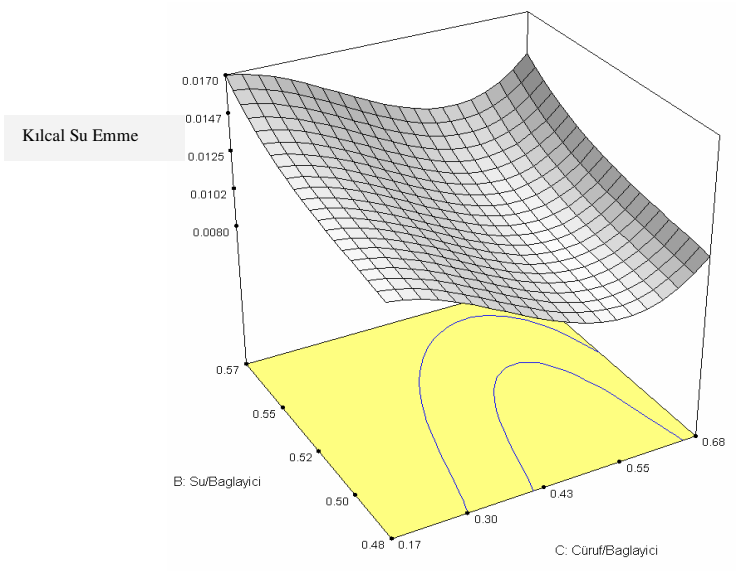
Şekil D.18: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Hızlı Klorür Geçirimliliği Analizi



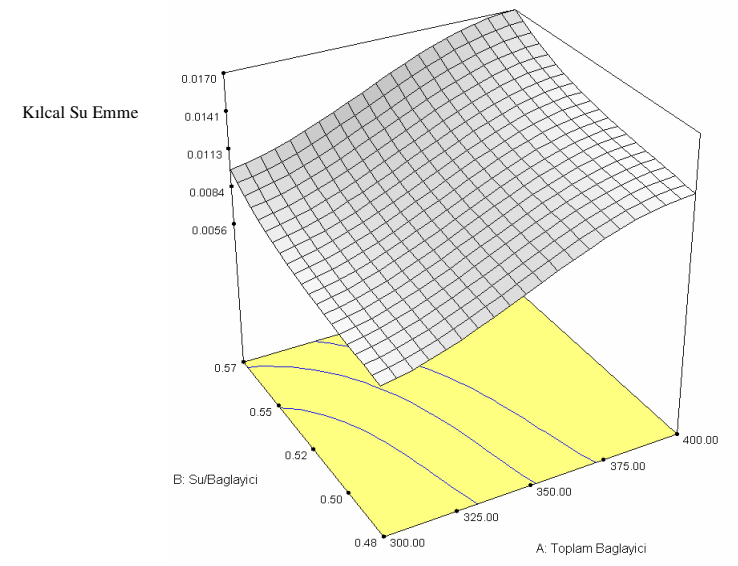
Şekil D.19: Su Kürü Uygulanmış 300 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



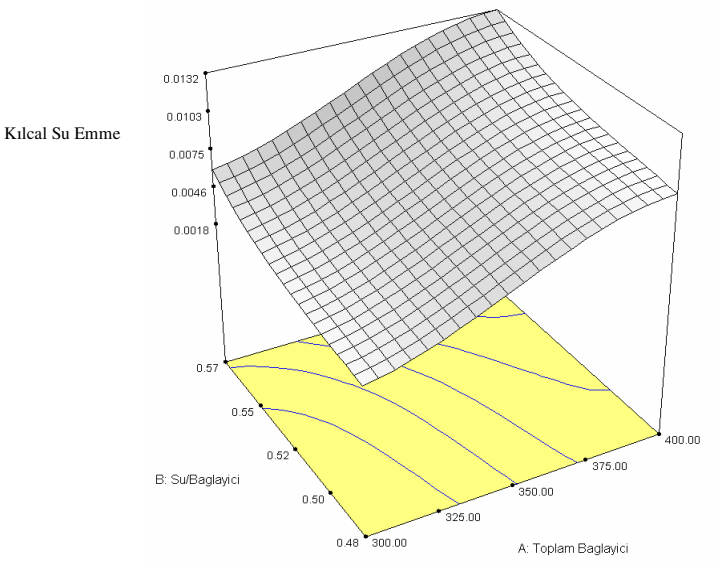
Şekil D.20: Su Kürü Uygulanmış 350 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



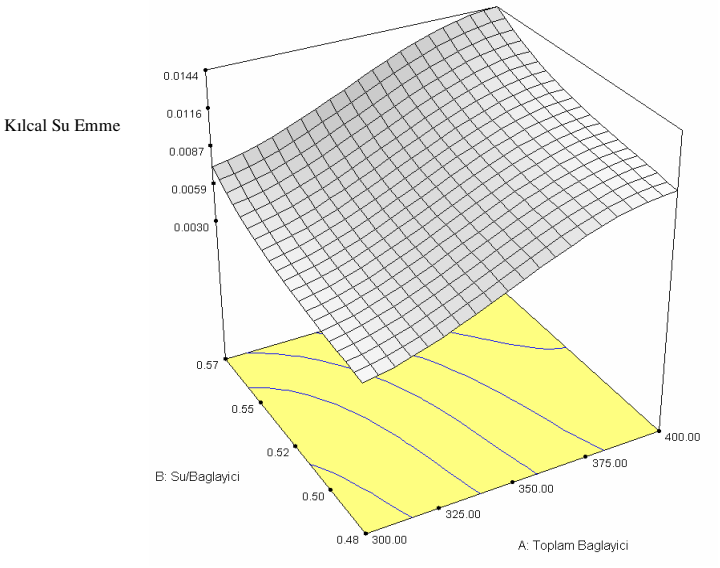
Şekil D.21: Su Kürü Uygulanmış 400 Dozlu Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



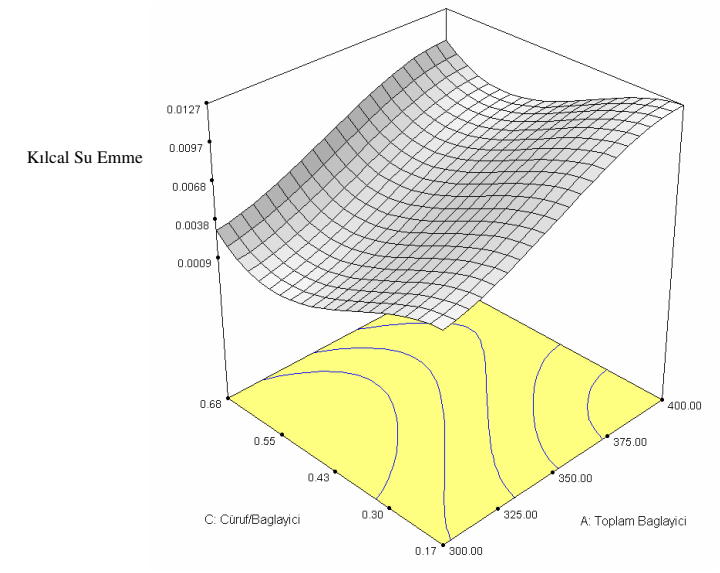
Şekil D.22: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %17 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



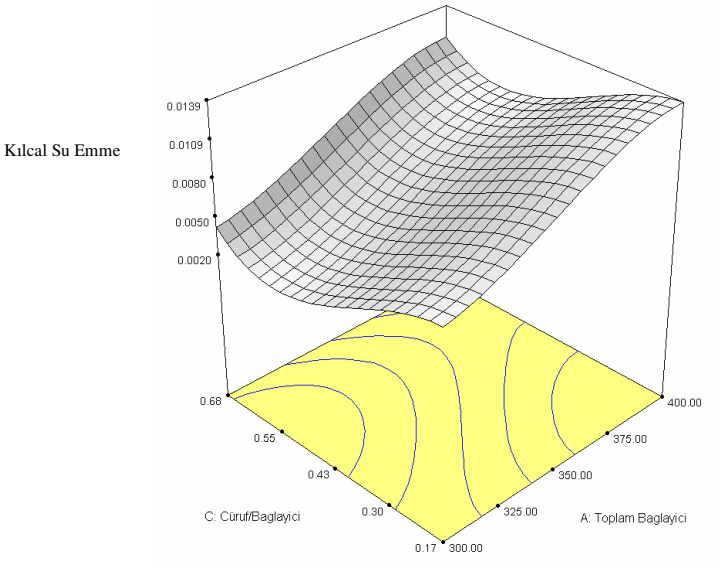
Şekil D.23: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %43 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



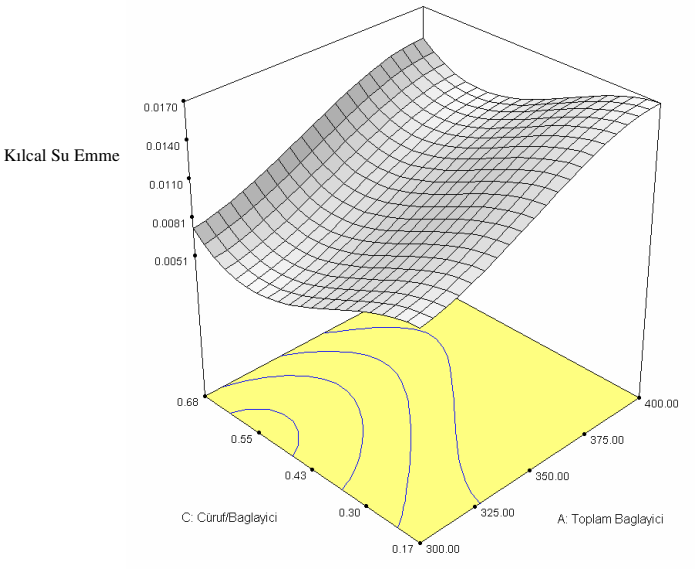
Şekil D.24: Su Kürü Uygulanmış Cüruf/Toplam Bağlayıcı Oranı %68 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



Şekil D.25: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %48 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



Şekil D.26: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %53 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi



Şekil D.27: Su Kürü Uygulanmış Su/Toplam Bağlayıcı Oranı %57 Olan Numunelerin Kılcal Su Emme Analizi

ÖZGEÇMİŞ

07 Mart 1982 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini İstanbul Bekir Esener İlkokulu, ortaöğrenimini Sakarya Akyazı Şht. Yüzbaşı Halilibrahim Sert Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı Yapı Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2007 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı.