

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETON BİLEŞİM PARAMETRELERİNİN
GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ VE GÖMÜLÜ
ÇELİK DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
İnş. Y. Müh. Ünal Anıl DOĞAN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

ARALIK 2008

**BETON BİLEŞİM PARAMETRELERİNİN
GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ VE GÖMÜLÜ
ÇELİK DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ
İnş. Y. Müh. Ünal Anıl DOĞAN
(501992413)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Aralık 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)

Prof.Dr. Abdurrahman GÜNER (N.K.Ü.)

Y.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM

ARALIK 2008

ÖNSÖZ

Yıllar önce, doktora çalışmamın başlangıcında, henüz ders aşamasındayken, sayın hocam Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL ‘Çelik donatı korozyonu üzerine çalışmayı düşünür müsün?’ diye sorduğunda bu konunun ne yapıların hizmet süresinin belirlenmesinde en önemli unsur olduğunun ne de sonraki yıllar içinde dünyada en çok çalışılacak başlıklardan biri olacağına farkında değildim. Bu bakımdan Yüksek Lisans çalışma konumun belirlenmesinde de aynı öngörüyle beni yönlendiren, tecrübelerinden faydalandığım, sayın hocam Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL’a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında geçirmiş olduğum ilk 8 yıl içerisinde doktora çalışmamla ilgili olsun olmasın sorularına sabırla cevap veren, tartışan, olayları kavratmaya çalışan, ayrıca mütevazılığı ve özverisiyle nasıl bir hoca olunması gerektiğini gösteren, okuduğu kitaplardan, İstanbul’dan, yalılarından, adalardan kısacası hayattan aldığı zevkle her zaman örnek olan, daha bize katacağı çok şey varken zamansız aramızdan ayrılan merhum hocam Prof. Dr. Mehmet UYAN’ı da sonsuz şükranla anmak istiyorum. Birlikte çalıştığım kısa süre içerisinde kendisinden donatı korozyonu hakkında çok şey öğrendiğim Prof. Dr. Carmen ANDRADE’ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Başta anabilimdalı başkanımız Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR olmak üzere Yapı Malzemesi Anabilim Dalı’ndaki diğer hocalarıma, özellikle sonuçların değerlendirilmesinde sabırla benimle tartışan arkadaşlarım, meslektaşlarım Cengiz ŞENGÜL, Dr. Hakan Nuri ATAHAN ve Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ’ye teşekkür ederim. Ayrıca canım dostum, kardeşim Dr. Tuğba ÖLMEZ’e de bu çalışmanın son aşamalarına kadar verdiği destekten dolayı çok teşekkür ederim. Deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen tüm Yapı Malzemesi Laboratuvar emekçilerine teşekkür ederim.

Bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü Sika Yapı Kimyasalları Teknik Servis Müdürü, sevgili arkadaşım Ali Raif SAĞLAM’a, Soyak Beton Kalite Kontrol Sorumlusu Gülerden KARA’ya ve Akçansa Çimento çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Herşeyin kirlendiği bir dünyada bana paylaşımın, dostluğun, fedakarlığın ve dayanışmanın en güzel örneklerini yaşatan dostlarıma, bilimsel düşünceyi bilincime kazıyan, zorluklarla yılmadan, umutla mücadele etmeyi ve emeğin esas olduğunu öğreten, kısacası beni ben yapan aileme, büyük aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, sevgili eşim, dostum, her şeyim İ. Banu DOĞAN’a aldığım her nefeste yanımda ve destek olduğu için, bana yaşattığı ‘güneş’li günler için minnettarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesindeki maddi katkılarından dolayı İ.T.Ü. Rektörlüğü Araştırma Fon Saymanlığı’na ve TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu’na (MAG) teşekkürü borç bilirim.

Eylül 2008

Ünal Anıl Doğan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. BİR YAPI MALZEMESİ OLARAK BETON	4
2.1 Betonun Bileşenleri	4
2.1.1 Çimento	4
2.1.2 Agregası	5
2.1.3 Kimyasal ve Mineral Katkıları	5
2.2 Betonun İyapısı	6
2.2.1 Çimento Hidratasyonu ve Sertleşmiş Çimento Hamuru İyapısı	6
2.2.2 Betonun Boşluk Yapısı ve Geçirimsizlik	9
2.3 Betonun Dayanıklılığı	11
2.4 Betonda Hasar Oluşumu	14
2.4.1 Taşınma Süreçleri	14
2.4.1.1 Difüzyon	16
2.4.1.2 Emilme	16
2.4.1.3 Geçirimsizlik	17
2.4.2 Karbonatlaşma	18
2.4.3 Asit Etkisi	18
2.4.4 Sülfat Etkisi	18
2.4.5 Alkali – Silika Reaksiyonu	19
2.4.6 Klorür Etkisi	19
2.4.7 Donma–Çözülme Etkisi	20
3. MİNERAL KATKILARIN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ	21
3.1 Uçucu Kül	22
3.1.1 Fiziksel Özellikleri	23
3.1.2 Beton Dayanıklılığına Etkisi	25
3.1.3 Kürün Önemi	26
3.2 Yüksek Fırın Cürufu	27
3.2.1 Yapısı ve Özellikleri	28
3.2.2 Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	29
3.3 Silis Dumani	30
3.3.1 Beton Özellikleri Üzerine Etkisi	32
4. BETONA GÖMÜLÜ DONATI KOROZYONU	35
4.1 Korozyon Mekanizması	36
4.1.1 Karbonatlaşma	38

4.1.2 Klorür ve Oksijen Konsantrasyonunun Etkisi	39
4.2 Korozyon Ölçüm Yöntemleri	41
4.2.1 Ağırlık Kaybı Ölçümleri	42
4.2.2 Elektrokimyasal Yöntemler	42
4.2.2.1 Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Potansiyeli)	43
4.2.2.2 Polarizasyon Direnci Yöntemi (Lineer Polarizasyon)	44
4.2.2.3 Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopi Yöntemi	45
4.2.2.4 Çevrimsel Polarizasyon Yöntemi	47
4.2.2.5 Makrohücre Yöntemi	47
4.2.2.6 Potansiyostatik/Galvanostatik Yöntemler	49
4.2.2.7 İletkenlik Ölçümleri	50
5. DENEYSEL TASARIM VE ÇÖZÜMLEME YÖNTEMLERİ	53
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	56
6.1 Malzemeler	56
6.1.1 Bağlayıcı Maddeler	56
6.1.2 Agregalar	56
6.2 Beton Bileşimlerinin Tasarımı	58
6.2.1 Değişkenler ve Sınırlarının Belirlenmesi	58
6.2.2 Betonun Hazırlanması	60
6.3 Dene Yöntemleri	60
6.3.1 Kılcal Su Emme	60
6.3.2 Basıncı Su Geçirimsizliği	61
6.3.3 Yüzeyden Su Emme Deneyi	61
6.3.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi	62
6.3.5 Cıvalı Porozimetre Deneyi	62
6.3.6 Korozyon Hızı Ölçümleri	62
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	64
7.1 Silis Dumanı İçeren Karışımlar	65
7.1.1 İstatistiksel Değerlendirme	68
7.1.2 Cıvalı Porozimetre Deneyi	73
7.1.3 Basınç Dayanımı Deneyi	76
7.1.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi	77
7.1.5 Yüzeyden Su Emme (ISAT) Deneyi	80
7.1.6 Kılcal Su Emme Deneyi	81
7.1.7 Basıncı Geçirimsizlik Deneyi	83
7.2 Uçucu Kül İçeren Karışımlar	84
7.2.1 İstatistiksel Değerlendirme	88
7.2.2 Cıvalı Porozimetre Deneyi	94
7.2.3 Basınç Dayanımı Deneyi	97
7.2.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi	99
7.2.5 Yüzeyden Su Emme Deneyi	100
7.2.6 Kılcal Su Emme Deneyi	102
7.2.7 Basıncı Geçirimsizlik Deneyi	103
7.3 Optimum Karışımlar	105
7.3.1 Optimizasyon Prensipleri	105
7.3.2 Beton Özelliklerinin Analizi	106
7.3.3 Maliyet Analizi	107
7.4 Korozyon Deneyleri	110

8. SONUÇLAR	115
9. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER	119
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	135

KISALTMALAR

SD	: Silis dumanı
UK	: Uçucu kül
S/B	: Su/bağlayıcı oranı
SD/B	: Silis dumanı/bağlayıcı oranı
UK/B	: Uçucu kül/bağlayıcı oranı
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrate
HKG	: Hızlı klorür geçirimsiliği
ISAT	: Initial surface absorption test
YSE	: Yüzeyden su emme

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Çimento Ana Bileşenleri	7
Tablo 3.1 : Beton Özelliklerine Bağlı Olarak Seçilebilecek Silis Dumanı Dozajları (Lewis ve diğ., 2003).....	33
Tablo 4.1 : Çelik Donatının Farklı Referans Elektrodulara Göre Yarı Hücre Potansiyellerinin Değerlendirme Ölçütleri	44
Tablo 4.2 : Betona Gömülü Donatı Korozyonunu Değerlendirme Teknikleri.....	52
Tablo 6.1 : Çimento, Uçucu Kül ve Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	57
Tablo 6.2 : Agregaların Tane Boyut Dağılımları ve Özgül Ağırlıkları	57
Tablo 6.3 : Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Betonlar İçin Belirlenen Değişkenler ve Değişim Aralıkları	59
Tablo 7.1 : Açıkta Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Boşluk Oranı (Porozite), 90 Günlük Basınç Dayanımı ve Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deney Sonuçları	65
Tablo 7.2 : Açıkta Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Yüzeiden Su Emme (ISAT), Kılcallık Katsayısı ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Deney Sonuçları	66
Tablo 7.3 : Suda Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Boşluk Oranı (Porozite), 90 Günlük Basınç Dayanımı ve Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deney Sonuçları	67
Tablo 7.4 : Suda Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Yüzeiden Su Emme (ISAT), Kılcallık Katsayısı ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Deney Sonuçları	68
Tablo 7.5 : Açıkta Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Boşluk Oranı, 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	69
Tablo 7.6 : Açıkta Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Yüzeiden Su Emme (ISAT), Kılcallık ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	69

Tablo 7.7 : Suda Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Boşluk Oranı, 90 Günlük Basınç Dayanımı ve Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	70
Tablo 7.8 : Suda Saklanan SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	70
Tablo 7.9 : Her İki Kür Koşulu İçin SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Boşluk Oranı, 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Modellerinden Elde Edilen Fonksiyon Katsayıları.....	72
Tablo 7.10: Her İki Kür Koşulu İçin SD Katkılı Beton Karışımlarına Ait Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık Katsayısı ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Modellerinden Elde Edilen Fonksiyon Katsayıları	72
Tablo 7.11: Havada Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Boşluk Oranı (Porozite), 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Denev Sonuçları	85
Tablo 7.12: Havada Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık Katsayısı ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Denev Sonuçları	86
Tablo 7.13: Suda Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Boşluk Oranı (Porozite), 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Denev Sonuçları	87
Tablo 7.14: Suda Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Bileşim, Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık Katsayısı ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Denev Sonuçları	88
Tablo 7.15: Açıkta Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Boşluk Oranı, 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	89
Tablo 7.16: Açıkta Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	89
Tablo 7.17: Suda Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Boşluk Oranı, 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	90
Tablo 7.18: Suda Saklanan UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık ve Basınçlı Su Geçirimsizliği Deneylerinin Varyans Analizi Sonuçları	90
Tablo 7.19: Her İki Kür Koşulu İçin UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Boşluk Oranı, 90 Günlük Basınç Dayanımı ve HKG Modellerinden Elde Edilen Fonksiyon Katsayıları	92

Tablo 7.20: Her İki Kür Koşulu İçin UK Katkılı Beton Karışımlarına Ait Yüzeyden Su Emme (ISAT), Kılcallık ve Basınçlı Su Geçirirliiliği Modellerinden Elde Edilen Fonksiyon Katsayıları	92
Tablo 7.21: Silis Dumanı Katkılı Betonlar İçin Belirlenen Optimum Karışımlar...	106
Tablo 7.22: Uçucu Kül Katkılı Betonlar İçin Belirlenen Optimum Karışımlar.....	107
Tablo 7.23: Beton bileşenlerinin birim fiyatları	107
Tablo 7.24: Beton maliyetlerinin varyans analizi sonuçları	108
Tablo 7.25: En yüksek performanslı ve düşük maliyetli beton karışımları	109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 :	Boşlukların Sınıflandırılması (Moon ve diğ., 2006).....	9
Şekil 2.2 :	Karbonatlaşma ve Klorür Etkisinde Korozyon Durumu İçin Hesaplanmış Hizmet Süreleri	13
Şekil 2.3 :	Betonda Hasar Oluşumu Çeşitleri	15
Şekil 2.4 :	Kılcal Su Emme	16
Şekil 3.1 :	Mineral Katkı Miktarı ve Özelliklerinin Beton Performansına Etkisi ..	22
Şekil 3.2 :	Uçucu Kül Tane Şekli	23
Şekil 3.3 :	Uçucu Kül Miktarının Hidratasyon Isısı Üzerine Etkisi	24
Şekil 3.4 :	Portland Çimentosu ve Yüksek Fırın Cürufunun CSH Sistemi İçerisindeki Yeri	29
Şekil 3.5 :	Aynı Derecede Büyütülmüş Portland Çimentosu (solda) ve Silis Dumanının (sağda) Görüntüsü	31
Şekil 3.6 :	Silis Dumanının Arayüzey Yapısı Üzerine Etkisi (a) ve (b) Silis Dumanı İçermeyen Taze ve Sertleşmiş Beton, (c) ve (d) Silis Dumanı İçeren Taze ve Sertleşmiş Beton (ACI Committee 234, 1996).....	33
Şekil 4.1 :	Betonarme Yapı Ömrü İçin Tasarlanan İki Aşamalı Korozyon Modeli (Elsener, 2001; Bentur ve diğ., 1997).....	36
Şekil 4.2 :	Betona Gömülü Çelik Donatının Tam Korozyon Hücresi	37
Şekil 4.3 :	Pasifleşen Bir Metalin Polarizasyon Eğrileri.....	38
Şekil 4.4 :	Alkalin Ortamdaki Çeliğin Anodik Polarizasyon Eğrisi İle Oksijen İndirgenmesini Temsil Eden Katodik Polarizasyon Eğrilerinin Aynı Eksen Takımında Görünümü (E:Potansiyel, I:Akım).....	40
Şekil 4.5 :	Artan Klorür Konsantrasyonu İle Birlikte Beton İçerisindeki Çeliğin Anodik Davranışının Değişimi.....	40
Şekil 4.6 :	Klorür Etkisi Altında Azalan Oksijen Konsantrasyonunun Korozyon Hızı Üzerindeki Etkisi.....	41
Şekil 4.7 :	Yarı Hücre Potansiyeli Ölçüm Şeması.....	43

Şekil 4.8 :	Lineer Polarizasyon Eğrisi (η :Potansiyel fark, i :Uygulanan akım).....	44
Şekil 4.9 :	Betona Gömülü Çeliğin Polarizasyonunda Elektrik Devre Modeli....	46
Şekil 4.10:	Alkalin Çözelti İçindeki Çeliğin Çevrimsel Polarizasyon Eğrisi.....	47
Şekil 4.11:	Makrohücre Yöntemi.....	48
Şekil 4.12:	İletkenlik Deneyleri İçin Lolipop Numune.....	50
Şekil 4.13:	ASTM C 1202 Deney Düzenegi.....	51
Şekil 6.1 :	Karışım Agrega Tane Boyut Dağılımı Ve Referans Eğrileri	58
Şekil 6.2 :	Üç Bağımsız Değişkenli Merkezi Kompozit Tasarım	59
Şekil 6.3 :	Kılcallık Deneyi	61
Şekil 6.4 :	Yüzeyden Su Emme Deneyi (Initial Surface Absorption Test).....	61
Şekil 6.5 :	Gecor 8 Korozyon Ölçüm Cihazı	63
Şekil 7.1 :	Boşluk Boyut Dağılımı ve Parametrelerin Tanımı.....	74
Şekil 7.2 :	Toplam Bağlayıcı Miktarları 400 kg/m^3 Olan Betonların Her İki Kür Koşulu İçin Elde Edilen Boşluk Oranı Tepki Yüzeyleri	75
Şekil 7.3 :	Toplam Bağlayıcı Miktarları 400 kg/m^3 Olan Her İki Kür Koşulu İçin Elde Edilen Kritik Boşluk Çapı Tepki Yüzeyleri	75
Şekil 7.4 :	İki Kür Koşulunda 350 kg/m^3 Bağlayıcı İçeren Silis Dumanı Katkılı Betonların SD/B Ve S/B Oranlarının Basınç Dayanımına Etkisi	77
Şekil 7.5 :	İki Kür Koşulunda 350 kg/m^3 Bağlayıcı İçeren Silis Dumanı Katkılı Betonların SD/B Ve S/B Oranlarının Klorür Geçirimselliğine Etkisi ...	78
Şekil 7.6 :	İki Kür Koşulunda 0.53 S/B Oranına Sahip Silis Dumanı Katkılı Betonların SD/B ve Bağlayıcı Miktarının Klorür Geçirimselliğine Etkisi	79
Şekil 7.7 :	Havada Saklanan, 0.45 ve 0.60 S/B Oranlarına Sahip Silis Dumanı Katkılı Betonların SD/B ve Bağlayıcı Miktarının Yüzeyden Su Emme Hızına Etkisi	81
Şekil 7.8 :	İki Kür Koşulunda 0.45 ve 0.60 S/B Oranlarına Sahip Silis Dumanı Katkılı Betonların SD/B ve Bağlayıcı Miktarının Kılcallığa Etkisi ...	82
Şekil 7.9 :	İki Kür Koşulunda 300 ve 400 kg/m^3 Bağlayıcı Miktarına Sahip Silis Dumanı Katkılı Betonların SD/B ve S/B Oranının Su İşleme Derinliğine Etkisi	84

Şekil 7.10:	Suda Saklanan UK Katkılı Betonlarda Boşluk Oranı ve Basınç Dayanımının Toplam Bağlayıcı Miktarı ve UK/B Oranı İle İlişkisi (S/B = 0.50).....	93
Şekil 7.11:	Modellerden Hesaplanan Optimum UK/B Oranları	94
Şekil 7.12:	300 kg/m ³ ve 400 kg/m ³ Bağlayıcı İçeren, Suda Saklanan Betonların Boşluk Oranı Tepki Yüzeyleri	95
Şekil 7.13:	UK/B Oranı 0.50 Olan Beton Boşluk Oranlarının Her İki Kür Koşulunda S/B Oranı ve Bağlayıcı Miktarı İle Değişimi.....	96
Şekil 7.14:	Suda Saklanan Betonların 0 Ve %16.8 UK/B Oranları İçin Elde Edilen Boşluk Oranı Tepki Yüzeyleri	96
Şekil 7.15:	Açıkta Tutulan Betonların 0 ve %50 UK/B Oranları İçin Elde Edilen Basınç Dayanımı Tepki Yüzeyleri	98
Şekil 7.16:	0.60 S/B Oranı İle Üretilen ve İki Farklı Kür Koşulunda Tutulan Betonların Basınç Dayanımı Tepki Yüzeyleri.....	99
Şekil 7.17:	0.45 S/B Oranı İle Üretilen ve İki Farklı Kür Koşulunda Tutulan Betonların Basınç Dayanımı Tepki Yüzeyleri.....	99
Şekil 7.18:	İki Kür Koşulunda 350 kg/m ³ Bağlayıcı İçeren Uçucu Kül Katkılı Betonların UK/B ve S/B Oranlarının Klorür Geçirimsizliğine Etkisi ..	100
Şekil 7.19:	İki Kür Koşulunda 0.60 S/B Oranına Sahip Uçucu Kül Katkılı Betonların UK/B Oranı ve Toplam Bağlayıcı Miktarının Yüzeyden Su Emme Hızına Etkisi	101
Şekil 7.20:	İki Kür Koşulunda 0.50 S/B Oranına Sahip Uçucu Kül Katkılı Betonların UK/B Oranı ve Toplam Bağlayıcı Miktarının Kılcallık Katsayısına Etkisi.....	102
Şekil 7.21:	İki Kür Koşulunda 0.60 S/B Oranına Sahip Uçucu Kül Katkılı Betonların UK/B Oranı ve Toplam Bağlayıcı Miktarının Kılcallık Katsayısına Etkisi.....	103
Şekil 7.22:	Her İki Kür Koşulu İçin Elde Edilen Basınçlı Su Geçirimsizliği Deney Sonuçları	104
Şekil 7.23:	Beton Maliyeti Tepki Yüzeyleri.....	108
Şekil 7.24:	Sodyum Klorür Çözeltisi İçerisinde Bekleyen Lolipop Numuneler ...	110
Şekil 7.25:	Silis Dumanı Katkılı Optimum Karışımların Klorür Etkisinde Korozyon Hızı Gelişimi.....	111
Şekil 7.26:	Silis Dumanı Katkılı Optimum Karışımların Klorür Etkisinde Korozyon Potansiyeli Gelişimi.....	111

Şekil 7.27:	Silis Dumanı Katkılı Optimum Karışımların Klorür Etkisinde Beton Özdirenci Gelişimi.....	112
Şekil 7.28:	Uçucu Kül Katkılı Optimum Karışımların Klorür Etkisinde Korozyon Hızı Gelişimi.....	113
Şekil 7.29:	Uçucu Kül Katkılı Optimum Karışımların Klorür Etkisinde Korozyon Potansiyeli Gelişimi.....	113
Şekil 7.30:	Uçucu Kül Katkılı Optimum Karışımların Klorür Etkisinde Beton Özdirenci Gelişimi.....	114

BETON BİLEŞİM PARAMETRELERİNİN GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİ VE GÖMÜLÜ ÇELİK DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ

ÖZET

Beton değişik boyutlarda ve miktarda boşluk içeren bir malzemedir. Bu nedenle bulunduğu ortamdaki sıvı ve/veya gazın beton içerisine girişi difüzyon, basınç altında emme veya kılcallık yoluyla gerçekleşir. Hangi yolla olursa olsun, beton içerisindeki sıvı veya gaz transferine betonun geçirimsizliği denir. Geçirimsizlik başta boşlukların miktarı olmak üzere boşlukların çapı ve dağılımına ayrıca birbirleriyle ilişkili olmasına bağlıdır. Çünkü yabancı maddelerin beton içerisine girme hızını boşlukların birbirleriyle ilişkili oluşu ve bu yolun şekli ve uzunluğu belirler.

Uzun yıllar boyunca betonun mekanik dayanımı uygun bir beton üretimi için yeterli bir koşul sayılmıştır ve ufak onarımlarla çıkabilecek sorunların üstesinden kolayca gelinebileceği düşünülmüştür. Ancak günümüzde “betonun kendisinden beklenen performansı hizmet süresi boyunca göstermesi” olarak tanımlanan dayanıklılık kavramı, yapının bulunduğu ortam şartlarına göre malzeme seçimi ile en uygun bileşimin belirlenmesi, buna ek olarak asgari bakımın (kür) ihmal edilmemesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Beton üretiminde kullanılan malzemeler dayanıklılık bakımından değerlendirilerek seçilmeli ve birleştirilmelidir. Günümüzde uçucu kül başta olmak üzere puzolanlar kullanılmadan üretilen betona rastlamak artık pek mümkün değildir. Çünkü uygun mineral katkı kullanımının betonun birçok dayanıklılık özelliğini geliştirdiği bilinmektedir.

Bu deneysel çalışmada uçucu kül veya silis dumanı katkılı betonlardan oluşan iki seri beton üretilmiştir. ‘Merkezi Kompozit Tasarım’ adındaki deneysel tasarım ve analiz yapan istatistiksel yöntem kullanılarak her seride karışım parametrelerinden toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Değişken sınırları puzolan özelliklerine ve betonların belirli bir kıvamda bulunması koşuluna göre belirlenmiştir. Her seride, kullanılan istatistiksel programın belirlediği 20 adet karışım hazırlanmıştır. Betonların basınç dayanımı ve geçirimsizlik özelliklerini ölçmek üzere alınan numunelerin yarısı laboratuvar ortamında havada diğer yarısı da kirece doymuş su içerisinde 90 gün boyunca saklanmıştır. Basınç dayanımının yanında ASTM C 1202 standardına uygun olarak hızlı klorür geçirimsizliği, BS 1881, bölüm 5’e uygun olarak yüzeyden su emme (Initial Surface Absorption Test), TS EN 12390 – 8 standardına uygun olarak basınçlı su geçirimsizliği ve kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca boşluk yapısının belirlenmesi amacıyla taze betondan eleme yoluyla çıkarılan harç numuneler üzerinde civalı porozimetre yöntemi uygulanmıştır. Tüm deney sonuçları varyans analizi yöntemi ile değerlendirilmiş, her iki kür koşulu için ölçülen tüm beton özelliklerinin karışım parametreleri cinsinde ayrı ayrı modelleri belirlenmiştir. Bu modeller kullanılarak betonların su ve klorür geçirimsizliklerinin en yüksek ve en düşük olduğu bileşimler belirlenmiştir. Bu bileşimler, hem modellerin sağlanmasını yapmak, hem de klorür etkisinde korozyon oluşumunda davranışlarını belirlemek

amacıyla ortasında çelik donatı içeren lolipop numunelerin üretiminde kullanılmıştır. Klorür etkisinde korozyon oluşumu Gecor 8 korozyon ölçüm aleti ile izlenmiştir. Betonun seçilen bileşim parametrelerinin (toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı) basınç dayanımı, geçirimsizlik özellikleri, boşluk yapısı ve korozyon davranışına etkisi deney sonuçlarına dayanılarak değerlendirilmiştir.

Uçucu kül katkılı betonlarda toplam bağlayıcı miktarının basınç dayanımı ve klorür geçirimsizliği üzerinde etkisi görülmemiştir. Diğer taraftan, silis dumanı katkılı betonlarda, çimento hamuru boşluk miktarının agreganınkinden daha fazla olması nedeniyle, artan bağlayıcı miktarı tüm beton performansında azalmaya neden olmuştur. Uçucu kül katkılı betonlarda en düşük geçirimsizlik için gerekli kül miktarlarının suda saklanan betonlarda havada saklanan betonlara göre bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak, silis dumanı katkılı betonlar için bulunan optimum silis dumanı miktarları kür koşullarına bağlı olarak değişmemiştir. Bunun yanında, hızlı klorür geçirimsizliği deneyinin, havada saklanan mineral katkılı veya katkısız tüm betonların karşılaştırılmasında veya suda saklanan mineral katkılı betonların kendi aralarındaki karşılaştırmalarda kullanılabileceği, özellikle suda saklanan betonlarda, mineral katkılı betonlarla yalın betonların klorür geçirimsizliklerini karşılaştırmak doğru sonuçlar vermeyeceği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, Merkezi Kompozit Tasarım yönteminin, puzolan katkılı betonların basınç dayanımı ve geçirimsizlik özelliklerinin optimizasyonunda en uygun beton bileşimini belirlemek için son derece elverişli olduğu görülmüştür.

EFFECT OF MIXING PARAMETERS ON PERMEABILITY PROPERTIES OF CONCRETE AND CORROSION OF EMBEDDED STEEL REBAR

SUMMARY

Concrete is a material which contains different amounts of pores in various sizes. On this account, penetration of liquid and/or gas into the concrete occurs by diffusion, absorption under pressure or capillary sorption through these pores. In no matter what way the transfer of liquid and gas, the phenomenon is called as permeability. Permeability depends on amount, distribution, size and connectivity of pores within concrete as rate of penetration of aggressive substances into concrete mainly related to the continuity of the pores and their shape and distance.

It has been widely accepted for many years that mechanical strength of concrete is adequate enough for a structure and little maintenance would be sufficient to overcome any problems during the service life. However, in recent years it is well known in order to obtain a durable concrete remaining the expected performance throughout its service life, selection of suitable material according to environmental conditions, the best proportion of concrete mixture and sufficient curing are the most important steps to pay attention.

Ingredients of concrete should be selected according to their participation in durability. Pozzolanic materials, most of which are by products of industries, are widely used in concrete production, especially to increase the durability properties.

In this experimental research, two series of concrete incorporated with fly ash and silica fume were produced. The statistical program of 'Central Composite Design' was used to design experiments and to analyze the testing results. In each series, binder content, water/binder ratio and pozzolan/binder ratio were chosen as independent variables and the ranges of the variables were adjusted according to the properties of pozzolanic material and to obtain certain workability for all concretes.

Two series of concretes, each corresponding to one type of supplementary cementing material and composed of 20 batches, are produced. Lime saturated water curing was applied over the half of the specimens, cast to measure compressive strength and permeability, while the remaining ones were stored in air at laboratory conditions for 90 days. In addition to the compressive strength and capillary water absorption tests, rapid chloride permeability test, initial surface absorption test and permeability under pressure test were conducted in accordance with ASTM C 1202, BS 1881, part 5, and TS EN 12390 – 8 standard test methods, respectively. Furthermore, mercury intrusion porosimetry test method was applied on mortars obtained by sieving fresh concrete, in order to determine pore structure of concretes. Test results were analyzed and evaluated by using ANOVA (Analysis of Variance). Statistical models are derived for each measured concrete property in two curing conditions by means of three independent components of concrete. Concretes having maximum and minimum permeabilities of water and chlorides were obtained by using these models. Chloride induced corrosion of steel bars embedded in these concrete was observed by using Gecor 8 corrosion ratemeter. Influence of selected mixture parameters on

compressive strength, permeability properties, pore structure and corrosion behavior was evaluated by using the test results.

It has been found that total binder content of FA concretes was not influential on the compressive strength and chloride penetration. On the other hand, increasing binder content reduced the overall performance of SF concretes because of the higher porosity of cement paste than that of aggregate. It was also seen that the optimum supplementary cementing material contents determined to obtain the minimum permeability are shifted to higher values for the FA concretes under the proper curing conditions rather than storing in air. However, the optimum percentages of the silica fume for SF concretes cured under both conditions are not changed. Furthermore, it is found that RCPT method can be employed to make comparisons for all of the air stored concretes produced with or without supplementary cementing material (SCM). However, for water cured SCM added specimens this method can be used for only internal comparisons, it is not appropriate to compare the chloride permeability of OPC concretes with those of pozzolan added concretes. Consequently, central composite design method is a promising approach for designing and optimizing the most convenient mixture proportion of SCM concretes with respect to compressive strength and permeability.

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılda oldukça fazla gelişme ve uygulama alanı bulan betonarme, gerektiği gibi planlanıp uygulandığında ekonomik, dayanıklı, yeterli dayanıma sahip ve istenilen şekilde üretilen en uygun yapı malzemesidir.

Beton, kullanım ömrü boyunca mekanik, fiziksel ya da kimyasal yollarla hasar görür. Kullanım (servis) ömrü boyunca, beton içerisine sıvı veya gaz girişi sonucu meydana gelen fiziksel ve kimyasal hasarlara karşı dirence, yani kendisinden beklenen performansı korumasına betonun dayanıklılığı adı verilir. Diğer bir deyişle donma-çözülme, asit, sülfat, alkali-agrega reaksiyonu ve klorür ya da karbonatlaşma etkisi ile korozyon gibi hasar mekanizmaları beton ve betonarme üzerinde etkili olabilir.

Beton boşluklu bir malzemedir. Bu nedenle bulunduğu ortamdaki sıvı ve/veya gazın beton içerisine girişi difüzyon, emme veya yayınma yoluyla gerçekleşir. Hangi yolla olursa olsun, beton içerisindeki sıvı veya gaz transferine betonun geçirimsizliği denir. Geçirimsizlik başta boşlukların miktarı olmak üzere boşlukların çapı ve dağılımına ayrıca birbirleriyle ilişkili olmasına bağlıdır. Çünkü yabancı maddelerin beton içerisine girme hızını boşlukların birbirleriyle ilişkili oluşu ve bu yolun şekli ve uzunluğu belirler.

Beton geçirimsizliği üzerinde en önemli etkenin su/çimento oranı olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan, konu ile ilgili uzmanlar uzun yıllardan beri puzolanların veya mineral katkıların betonun geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığını yaptıkları çalışmalarla göstermişlerdir (**Thomas ve diğ., 1989**) (**Pal ve diğ., 2002**) (**Song ve diğ., 2007**). Puzolanlar, başta bir hidratasyon ürünü olan serbest kireç (Ca(OH)_2) ile reaksiyona girebilmesi ve bunun yanında inceliğine bağlı olarak doldurma etkisi (filler effect) nedeniyle daha yoğun, dolu, geçirimsiz bir matris tabakası ve agrega-çimento ara yüzeyi oluşumuna yol açarlar. Böylece beton içerisindeki kılcal boşluklar azalır ve süresiz olması sağlanır. Ayrıca serbest kireci

tespit etmeleri nedeniyle kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı bir beton elde edilebilir.

Çelik ile betonun birlikte kullanılması sadece mekanik açıdan değil aynı zamanda uzun süre çelik donatının korunması açısından da en elverişli çözümdür. Betonun sahip olduğu bazik özellik (pH = 12.5 – 13) nedeniyle çelik donatıyı koruduğu ve çelik profillerle üretilen yapılara kıyasla korozyon problemini ortadan kaldırdığı söylenebilir. Kuramsal olarak böyle olsa da yetersiz projelendirme, eksik imalat, uygun olmayan malzeme seçimi, beklenenden daha zararlı ortamlara maruz kalma veya tüm bu etkenlerin bileşimi sonucu meydana gelen beton içerisindeki donatı korozyonu son otuz yıldır üzerinde en çok çalışılan durabilite problemlerinden biridir. Yapıların ömrünü belirlemede birinci etkenin donatı korozyonu olduğu bilinmektedir. Bu nedenle donatı korozyonunun oldukça karmaşık olan mekanizmasını tam olarak anlamak, mümkün olabilecek önlemleri almak ve uygun stratejiyi geliştirmek amacıyla birçok yöntem uygulanmaktadır.

Betona gömülü donatı korozyonu birçok farklı değişkene bağlıdır; beton içerisindeki bileşenler, bunların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, birbirleri ile oranları, beton üretim süreci (yerleştirme, kür koşulları, kalıp özellikleri vb.), yapısal tasarım ve yapının bulunduğu ortam koşulları, tüm hasar mekanizmalarını olduğu gibi gömülü donatı korozyonunun oluşum hızını, dolayısıyla yapının hizmet süresini belirleyen etkenlerin ilk akla gelenleridir.

Korozyon temel olarak klorür ve/veya karbonatlaşma etkisi ile başlayabilir. Klorür etkisinde korozyon oluşumu, karbonatlaşma sonrasında meydana gelen homojen korozyon oluşumunun tersine bölgesel ve donatı eksenine dik doğrultuda, derinlemesine ilerlemesi nedeniyle tehlikeli ölçülerde kesit kayıplarına neden olmaktadır. Bu da beton-donatı aderans kaybı yanında, paspayının çatlaması aşamasında önemli ölçüde yapısal yetersizlikler meydana getirmektedir. Bu nedenle klorür etkisinde korozyon söz konusu olduğunda yapı hizmet süresi sınırı, paspayı çatlaması ve dökülmesi aşamasından korozyon başlangıcı aşamasına çekilmektedir; yani hizmet süresi kısaltılmak zorunda kalmaktadır. İşte tüm bu nedenlerden dolayı betonun klorür geçirimsizliği ve klorür etkisinde korozyon başlangıcı ile ilerleme aşamaları yıllardır üzerinde çalışılan konuların başında gelmektedir.

Bu çalışmada en yaygın puzolanlar olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan ilk ikisinin beton geçirimsizlik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak iki seri halinde betonlar üretilmiş, her seride toplam bağlayıcı miktarı, puzolan/bağlayıcı oranı ve beton kalitesini belirleyen en önemli etken olan su/bağlayıcı oranı bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Üretilen tüm beton numunelerin yarısı su içerisinde diğer yarısı laboratuvar ortamında açıkta bekletilerek iki farklı kür koşulunun beton geçirimsizliği ve boşluk yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Betonların klorür geçirimsizliklerini belirlemek için ASTM C 1202 standardında verilen hızlı klorür geçirimsizliği deneyi, su geçirimsizliklerini belirlemek amacıyla ise kılcal su emme, basınçlı su geçirimsizliği ve yüzeysel su emme (Initial Surface Absorption Test-BS 1881 (1970) standardı 5. bölümü) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunların yanında civalı porozimetri deney yöntemi ile betonların boşluk yapısı belirlenmiştir.

Değişken sayısının ve inceleme düzeyinin fazlalığı nedeniyle hem deneysel tasarım hem de sonuçların analizi için istatistiksel bir yaklaşım olan Merkezi Karma Tasarım Yöntemi kullanılmıştır. Deney sonuçları ile belirlenen her bir özellik, seçilmiş olan bağımsız değişkenler cinsinden modellenmiş, kullanılan malzemeler ile belirli bir bileşimde üretilecek herhangi bir betonun geçirimsizlik özelliklerinin bileşim oranları cinsinde tahmin edilebilmesi sağlanmıştır. Son olarak su ve klorür geçirimsizlikleri hem maksimize hem de minimize edilmek suretiyle uç karışımlar belirlenmiş, bu karışımlarla üretilen korozyon numuneleri (lolipop) 1 M NaCl çözeltisi içerisinde ıslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerin içerisindeki çelik donatılar üzerinde oluşan korozyon, Gecor 8 adı verilen lineer polarizasyon yöntemini kullanan korozyon ölçüm aleti ile izlenmiş ve klorür etkisinde korozyon oluşumu incelenmiştir.

2. BİR YAPI MALZEMESİ OLARAK BETON

Çimento, agrega ve suyun uygun şekilde bir araya gelmesiyle üretilen betonun mekanik özellikleri çelik gibi sünek olmadığı halde dünyada en fazla kullanılan yapı malzemesi olması en başta çeliğe kıyasla atmosfer şartlarına çok daha dayanıklı olmasından ileri gelmektedir; özellikle su yapılarında kullanılması bu özelliğinden kaynaklanmaktadır. Çelik ile birlikte kullanılıp, mekanik olarak verimli sonuçlar elde edilmesinden sonra betonarme en yaygın olarak kullanılan yapı sistemi haline gelmiştir. Ayrıca betonun istenilen şekle sokulabilmesi ve hammaddesinin ucuz, kolay temin edilebilir doğal malzemeler olması da bir yapı malzemesi olarak betonun çekiciliğini korumasında önemli etkenlerdir. Öte yandan çeliği genel olarak korozyondan koruması, çelik ile aynı ısıl genişleme katsayısına sahip olması ve çelik ile iyi aderans oluşturması sistemin doğruş nedenleri olarak sayılabilir.

2.1 Betonun Bileşenleri

Beton, çimento ve suyun karışımından oluşan bağlayıcı bir matrisin içerisine gömülmüş, belirli bir tane boyut dağılımına sahip agregalardan oluşmaktadır. Temelde bu şekilde bir tanım yanlış sayılmamakla birlikte günümüzde bileşen malzemelere kimyasal ve/veya mineral katkıları da eklemek gerekir.

2.1.1 Çimento

Çimento, su ile karıştırıldığında meydana gelen hidrasyon reaksiyonu sayesinde bağlayıcılık özelliği kazanan, hidrolik bir yapı malzemesi olarak tanımlanabilir. Günümüzde beton üretiminde en çok kullanılan türü olan Portland Çimentosu, esas hammadde olarak kalker ve kilden elde edilir. İlk aşamada hammaddelerin döner fırınlarda 1500°C civarında sıcaklıklarda pişirilmesiyle klinker adı verilen işlenmemiş çimento elde edilir. Daha sonra klinker bir miktar alçı taşı (%5 civarında) ile birlikte öğütülerek çimento üretimi gerçekleştirilir.

2.1.2 Agregalar

Beton içerisinde doldurma etkisi gören, herhangi bir kimyasal etkileşim içinde bulunmayan, genellikle doğal kaynaklardan elde edilen taneli malzemelere agrega denir. Agregaların boşluk yapısı, şekli, yüzey durumu ve tane dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri, beton özellikleri üzerinde kimyasal ve mineralojik özelliklerine kıyasla daha etkilidir. Betonun hacim bazında %60 - %80'ini, ağırlıkça da 4/5'ini oluşturan agregalar tane boyut büyüklüğüne göre ince ve iri olmak üzere ikiye ayrılır. İnce agrega 4 mm'den küçük boyuttaki doğal ve kırma kumu, iri agrega ise 4 mm'den büyük boyuttaki kırmataş ve çakılı kapsar.

2.1.3 Kimyasal ve Mineral Katkılar

Beton teknolojisinde son 50 yıldır yer almakta olan kimyasal ve mineral katkıları betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır. Kimyasal katkıları, taze betonun işlenebilirliğini artırmak, terleme ve ayrışmayı engellemek, priz süresini değiştirmek, özel durumlarda betonun dayanıklılığını artırmak amacıyla üretilmiş ve çimento ağırlığının %5'ini aşmayan oranda kullanılan maddelerdir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan akışkanlaştırıcıların bile iklim, üretim hızı, beton dayanım düzeyi gibi koşullara göre seçilebilecek birçok çeşidi bulunmaktadır.

Kendi başına bağlayıcı özelliği olmayan ancak ortamda kireç ve su bulunması durumunda bağlayıcı özellik kazanan mineral katkıların en önemlileri uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlardır. Mineral katkıları (puzolanlar) betona kimyasal katkıları oranla çok daha yüksek miktarlarda katılırlar. Doğal olanları bulunsada çoğunluğu bazı sanayilerin atıkları veya yan ürünleri şeklinde elde edilmektedir. Çimentonun bir kısmı ile yer değiştirilerek kullanılmaları durumunda taze beton özelliklerini bir ölçüde değiştirmekle birlikte asıl etkileri çimentonun hidratasyonu sırasında ve sonrasında meydana gelen puzolanik reaksiyonla ortaya çıkar. Bunun yanında katkılı çimento üretiminde de kullanılmaktadır. Yapılmış olan birçok çalışmada hidratasyon ısısını düşürdüğü için termik rötreten kaynaklanan çatlak oluşumunu engellediği (Neville, 2004), uzun süre boyunca dayanım artışına neden olduğu (Özer ve Özkul, 2004a) (Poon ve diğ., 1999), betonun geçirimsizliğini artırdığı (Thomas ve Bamforth, 1999), klorür (Leng

ve diğ., 2000) (Swamy ve Laiw, 1995) ve sülfat etkisi (Mehta, 1992) ile alkali-agrega reaksiyonuna karşı dayanıklılığı artırdığı (Nagataki ve Wu, 1995) birçok çalışmada gösterilmiştir.

2.2 Betonun İçyapısı

Malzemelerin davranışları genel olarak içyapılarına bağlıdır. Günümüzde tam olarak anlaşılamayan birçok mekanizmaların çözümü malzemelerin içyapıları daha iyi anlaşılabilir. Yüksek derecede heterojen bir yapıya sahip olan betonun içyapısının çimento hamuru, agrega ve bunların arayüzeylerinden oluştuğu söylenebilir.

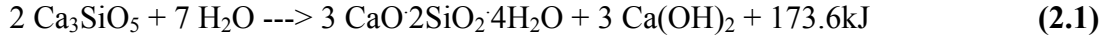
Makro düzeyde değerlendirildiğinde çimento hamuru içerisine dağılmış agregalardan oluşan beton, mikro düzeye inildiğinde anlaşılması oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Beton içerisindeki diğer bileşenlere göre daha zayıf bir yapıda olan, kapladığı hacimsel orana nazaran betonun mekanik ve geçirimsizlik özelliklerini birinci derecede etkilediği düşünülen agrega-çimento hamuru ara yüzeyi, uzun yıllardır üzerinde çalışılan içyapı konularından biridir. Sertleşmiş çimento hamuru ile ara yüzeyin boşluk ve doluluk oranlarının mikro düzeyde farklılıklar göstermesi ve buna ilaveten çimentonun hidrasyonunun ortam şartlarına bağlı olarak zaman içinde değişme özelliği, bu zamana kadar gerçekleştirilmiş çalışmalardan elde edilen verilerin gerekliliğini göstermektedir. Bundan dolayı çimento hidrasyonunu kısaca tekrar etmek beton içyapısını ve betonun fiziksel, mekanik özelliklerine etkisini anlamak açısından gereklidir.

2.2.1 Çimento Hidrasyonu ve Sertleşmiş Çimento Hamuru İçyapısı

Portland çimentosu temel olarak 4 ana bileşen (Tablo 2.1) ve birkaç ikincil bileşenden oluşur. Ana bileşenlerden kalsiyum silikatlar dayanım üzerinde etkilidir ve C₃S ilk günlerdeki, C₂S ilerleyen yaşlardaki dayanım artışından sorumludur.

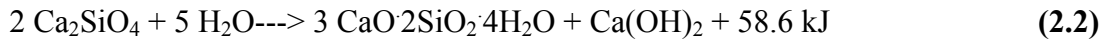
Su ile temas anından itibaren hidrasyon başlar. Trikalsiyum silikat hemen tepkimeye girerek kalsiyum ve hidroksil iyonlarıyla birlikte oldukça yüksek oranda enerji açığa çıkarır (2.1). Salınan hidroksil iyonları nedeniyle pH değeri 12'nin üzerine çıkar. Ardından ortam doygun hale gelene kadar kalsiyum ve hidroksil iyonu

salınımı devam eder. Bu sırada kalsiyum silikat hidratların oluşumu ve kalsiyum hidroksitin kristalleşmesi aynı anda başlar. Bu anda ısı çıkışı en üst düzeyine ulaşmıştır:



Oluşan kalsiyum silikat hidratlar anhidrit çimento taneleri üzerinde bir tabaka oluşturarak suyun bu tanelere ulaşmasını ve böylece hidratasyon reaksiyonunu yavaşlatırlar. Ancak ortamda su ve yeterli boşluk bulunması durumunda hidratasyon devam eder.

Dikalsiyum silikatlar da trikalsiyum silikatlara benzer fakat daha yavaş şekilde su ile tepkimeye girerler. Açığa çıkan ısı da daha düşük seviyede olmakla birlikte ürünler aynıdır:



Tablo 2.1: Çimento Ana Bileşenleri

Çimento Bileşeni	Ağırlıkça Oranı	Kimyasal Formülü
Trikalsiyum silikat	50 %	Ca_3SiO_5 veya $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Dikalsiyum silikat	25 %	Ca_2SiO_4 veya $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Trikalsiyum alüminat	10 %	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ veya $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Tetrakalsiyum alüminoferrit	10 %	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ veya $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

Trikalsiyum alüminat ve tetrakalsiyum alüminoferrit de aynı şekilde su ile temas anından itibaren tepkimeye girer ancak bunların alçı ile aralarında meydana gelen reaksiyondan dolayı hidratasyon mekanizmaları bir miktar daha karmaşıktır. İlk olarak ani prizi engellemek amacıyla katılan alçı (kalsiyum sülfat) ile tepkimeye girerek etrenjit oluşturan C_3A , alçının tükenmesinden sonra etrenjit ile yeni bir tepkimeye girerek hidrate kalsiyum monosulfoalüminatları ($\text{C}_4\text{A}\hat{\text{S}}\text{H}_{12}$) oluşturur ($\hat{\text{S}}=\text{SO}_3$). Etrenjitin de tükenmesi halinde ise kalan trikalsiyum alüminatlar, kalsiyum alümina hidrate bileşiklerini (C_4AH_{19}) meydana getirir. Trikalsiyum alüminatların esas hidratasyon ürünü etrenjittir (Collepardi ve diğ., 1979) (Pommersheim ve Chang, 1988). Hidrate kalsiyum monosulfoalüminat ($\text{C}_4\text{A}\hat{\text{S}}\text{H}_{12}$) ve kalsiyum alümina hidrate bileşikleri (C_4AH_{19}), sadece C_3A ile alçı miktarlarının dengeli

olmaması durumunda açığa çıkarlar (**Odler, 2004**). Tetra kalsiyum alüminoferrit de aynı tepkimeleri daha yavaş olmak üzere gerçekleştirir.

Sertleşmiş çimento hamuru, kristal ve amorf haldeki katı kısımları olan boşluklu bir yapıya sahiptir. Katı kısmın ana unsuru yaklaşık hacimce yarısını kaplayan, amorf haldeki kalsiyum silikat hidratelelerdir (C-S-H). Bu nedenle içyapısı düzensiz ve tam olarak tanımlanamayan parçalardan oluşur. İçeriğindeki Ca/Si oranı 1,5 ile 2 arasında, su miktarı daha büyük oranda değişir. Özellikleri yaşına, sıcaklığa, su/çimento oranına ve içerisindeki diğer oksitlerin miktarına bağlıdır. Eser miktarda da olsa içerdiği kristal yapılar düzensiz yapısı nedeniyle tam olarak çözülmemiştir. Buna rağmen malzemenin özelliklerini tanımlayabilmek amacıyla birkaç model önerilmiştir. Powers-Brauner modeline göre (**Powers, 1958**) (**Brunauer, 1962**) kalsiyum silikat hidrate bileşikleri çok yüksek yüzey alanına sahip tabakalı bir yapıdadır. Ölçüm tekniğine bağlı olarak 100 ila 700 m²/g (**Winslow ve Diamond, 1974**) (**Volkl ve diğ., 1987**) yani anhidr çimentodan yaklaşık üç mertebe daha yüksek yüzey alanına sahip olduğu belirlenmiştir. Feldman-Sereda (**1970**) modeline göre ise C-S-H'ler düzensiz, kıvrımlı ve aralarında rasgele boşluklar içeren tabakalı bir yapıdan oluşmaktadır.

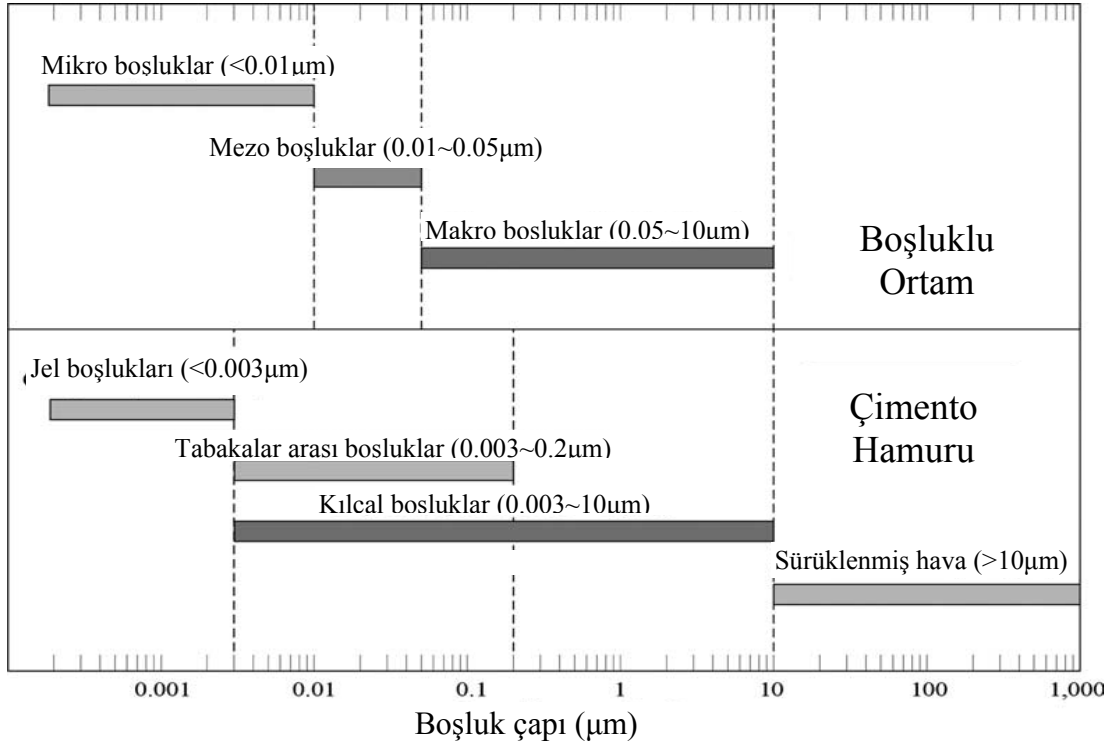
Hacimsel olarak ikinci sırada, sertleşmiş çimento hamurunun yaklaşık dörtte birini meydana getiren Ca(OH)₂ kristalleri bulunur. Bağlayıcının içeriği, sıcaklık ve boşluk durumuna göre değişmekle birlikte genellikle hegzagonal düzlemler halindedir. Geriye kalan katılar ise prizma şeklinde olan iğnemsî kristal yapıdaki etrenjit, yine hegzagonal düzlem şeklinde olan hidrate monosülfoaluminatlar ve kalsiyum alümina hidratelelerle anhidr çimento tanelerinden meydana gelmektedir.

İlk yaşlarda sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki boşlukların neredeyse tamamı su ile kaplıdır. Bunlar, kılcal boşluklarda, C-S-H tabakaları arasında ve hidrate ürünlerin içinde yapısal olarak bulunurlar. Birincisi sürekli olarak azalır ve su ile temas durumu söz konusu olmazsa tamamen kaybolur. Bu suyun kaybı genel olarak hacimde herhangi bir değişikliğe neden olmaz. Tabakalar arasındaki su ancak ortam bağıl neminin %11'in altına düşmesi halinde kaybolur (**Powers, 1960**) ve bu durumda önemli ölçüde büzülmeler görülür. Hidrate ürünlerin içindeki kimyasal olarak bağlanmış su hiçbir durumda kaybolmaz.

2.2.2 Betonun Boşluk Yapısı ve Geçirimsizlik

Betonun boşluk yapısının performansını doğrudan etkilediği bilinmektedir. Özellikle yabancı agresif çözeltilerin beton içerisine girerek hasar verme hızını, betonun boşluk oranı ve boşluk yapısı belirler. Betonun geçirimsizliği ise herhangi bir sıvı veya gazın kütle içerisine giriş hızının belirlenmesi ile bulunur ve beton özelliklerini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyeceğinden, beton dayanıklılığı ile doğrudan ilgilidir.

Betonda boşluk miktarı su/çimento oranı, çimento özellikleri, mineral katkıları, agrega yüzey durumu, kür koşulları ve betonun içerisindeki katıların homojenliği gibi birçok değişkene bağlıdır. Sertleşmiş çimento hamuru veya betondaki boşluklar, hapsolmuş ya da sürüklenmiş hava boşlukları ile karışım suyunun uzaklaşması sonucu meydana gelen kılcal ve hidrate ürün tabakaları arasındaki boşluklardan ibarettir. Betonun içyapısını değerlendirmek amacıyla boşluklar boyutlarına göre sınıflandırıldığında Şekil 2.1'de görüldüğü üzere mikro, mezo ve makro boşluklar olarak isimlendirilir. Ancak çimento hamuru içerisindeki konumuna göre, jel boşlukları, tabakalar arası boşluklar, kılcal boşluklar ve sürüklenmiş hava boşluklarından oluşan dört grup ortaya çıkar.



Şekil 2.1: Boşlukların Sınıflandırılması (Moon ve diğ., 2006)

Çimento esaslı malzemelerde boşluk oranı ve daha önemlisi bunların dağılımı ve sürekliliği geçirimsizliği belirleyen en önemli etkidir. Özellikle belirli bir çaptan büyük olan boşluk miktarı geçirimsizlikte söz sahibidir. Bu nedenle civalı porozite yöntemi ile elde edilen boşluk dağılımı grafiklerinin büküm noktası, en küçük sürekli boşluk çapını göstermesi bakımından sıklıkla kullanılmaktadır (**Goto ve Roy, 1981**).

Çimento-agrega arayüzeyinin çimento hamuruna göre daha boşluklu bir yapıya sahip olması nedeniyle beton geçirimsizliğinde etkin rol aldığı belirtilmektedir. Ancak, Larbi (**1993**) bu durumu inkar etmemekle birlikte maddelerin taşınmasında arayüzeyin daha karmaşık ve agregalardan dolayı daha uzun bir yol katetmesi gerektiğinden dolayı söz konusu önermenin belirsizlik taşıdığını ifade etmiştir.

Boşluklu bir ortamda geçirimsizliği tanımlayabilmek için birçok yöntem ve çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bunların arasında en çok kullanılan yöntem Darcy kuralından yararlanarak geçirimsizliği tanımlamaktır (**Brown ve diğ., 1991**). Aşağıda verilen

$$k = -\mu Q / [A \delta g (dh/dz)] \quad (2.3)$$

ifadesinde k geçirimsizlik katsayısını, Q birim zamanda A alanından toplanan su miktarını, μ sıvının viskozitesini, δ sıvının yoğunluğunu, g yerçekimi ivmesini ve (dh/dz) ise akışı gerçekleştiren basıncı göstermektedir.

Diğer bir sık karşılaşılan model Carman-Kozeny modelidir (**Brown ve diğ., 1991**). Bu modelde boşluk çapı, boşluk hacminin boşluk yüzey alanına oranının dört katı olarak kabul edildiğinden geçirimsizlik ile toplam boşluk oranı ve boşluk yüzey alanı ilişkilendirilmektedir. Diğer taraftan Nokken ve Hooton (**2008**) tarafından boşluk parametrelerinin geçirimsizliğin tahmininde kullanılması üzerine yapılmış bir çalışmada, Carman-Kozeny modelinde, çimento hamurunun yapısından dolayı ölçülen yüksek özgül yüzey alanının, geçirimsizliği olduğundan çok daha yüksek bulunmasına neden olduğu gösterilmiştir (**Garboczi, 1990**). Garboczi, (**1990**) süzülme teorisini (percolation theory) esas alan Katz-Thompson modelinin çimento hamurunun kıvrımlı yapısına uygun olduğunu ifade etmiş olsa da daha sonra yapılmış olan bazı çalışmalarda (**El Dieb ve Hooton, 1994**) (**Tumidajski ve Lin,**

1998) bu model kullanılarak hesaplanan geçirimsizlik değerleriyle ölçülenler arasındaki korelasyonun oldukça zayıf olduğu sonucuna varılmıştır.

Boşluk yapısından yola çıkarak geçirimsizlik hakkında tahmin yürütmek için yapılan çalışmalarda gerek sertleşmiş çimento hamurunun karmaşık ve değişken yapısından kaynaklı gerekse doygunluk derecesi, çatlak durumu gibi dış unsurların etkisinin göz önünde bulundurulma zorluğu her koşula uygun tek bir modelin bulunmasını zorlaştırmıştır.

2.3 Betonun Dayanıklılığı

Uzun yıllar boyunca betonun dayanımı uygun bir beton üretimi için yeterli bir koşul sayılmıştır ve ufak onarımlarla çıkabilecek sorunların üstesinden kolayca gelinebileceği düşünülmüştür. Ancak günümüzde “betonun kendisinden beklenen performansı hizmet süresi boyunca göstermesi” olarak tanımlanan dayanıklılık kavramı, yapının bulunduğu ortam şartlarına göre malzeme seçimi ile en uygun bileşimin belirlenmesi, buna ek olarak asgari bakımın (kür) ihmal edilmemesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Yüksek dayanımlı bir betonun yüksek performanslı beton anlamına geleceği ilk bakışta mantıklı görünse de her zaman geçerli olmadığı gerçekleştirilen birçok çalışmada gösterilmiştir. Farklı ortamlara maruz kalacak betonlarda dayanıklılık ile ilgili olarak ilk başta en yüksek su/çimento oranı sınırlandırılmaktadır. Ancak, yüksek dayanımlı bir betonun gevrekliğinin de dayanımla birlikte artacağı bilindiğinde bunun mikro çatlak oluşumuna daha hassas bir durum ortaya çıkaracağı, dayanımda olmasa da dayanıklılık konusunda zafiyete neden olacağı kolayca anlaşılabilir.

Betonun uygun şekilde yerleştirilmesi ve ardından yeterli kür uygulanması, dayanıklılığın sağlanabilmesinin temel koşullarından iki tanesidir. Çünkü her ikisi de beton boşluk yapısını ve böylece dayanım ve dayanıklılığı etkileyen şantiye uygulamalarıdır.

Kalıplara yerleştirilen beton, mümkün olan en yüksek yoğunluğa gelene kadar sıkıştırılmalıdır. Günümüzde bu işlem çeşitli vibrasyon yöntemleri ile

gerçekleştirilmektedir. Kalıplara dökülen beton kıvamına bağlı olarak yaklaşık %5 ile %20 arasında hava boşlukları içerir (Neville, 2004). Schiessl, (1984) yetersiz yerleştirmenin geçirimsizliği 10 kattan fazla artırdığını belirtmiştir. Vibrasyon ile içsel sürtünme azaltılarak iri agreganın etrafının harç fazı tarafından sarılması sağlanır. Vibrasyon beton yüzeyinde terleme başladığı andan itibaren sonlandırılmalıdır; aksi halde iri agrega çökerek ayrışmaya (segregasyona) yani makro boyuttaki homojenliğin bozulmasına neden olur.

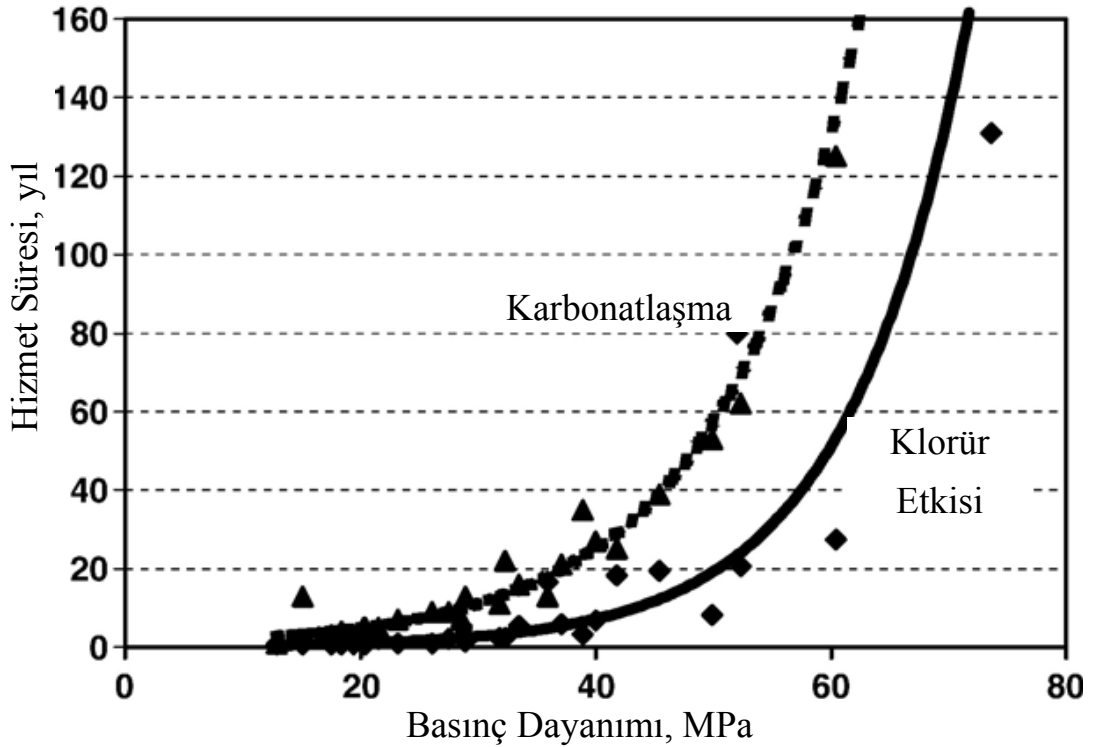
Beton içerisindeki kılcal boşluklardaki bağıl nemin %80'in altına düşmesi durumunda hidrasyon reaksiyonu devam etmektedir (Neville, 2004). Bu nedenle buharlaşmanın engellenmesi çok önemlidir. Bu konuda yıllar önce yapılmış ilk çalışmalardan birinde (Price, 1951) normal Portland çimentosu ile üretilen ve 6 ay boyunca havada tutulan numunelerin basınç dayanımlarında, su içerisinde kür edilenlere oranla %58 oranında azalma tespit edilmiştir. Yine aynı tip çimento ile üretilen betonların su içerisinde tutulanlarında 5 yıl boyunca sürekli bir artış görülürken havada tutulanlar aynı süre sonunda 28 günlük dayanımlarının ötesine geçememiştir (Wood, 1991). Aitcin ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (1994) bir yıl sonunda suda ve havada kür edilen betonlar arasında %17 ile %22 arasında dayanım farkı bulunmuştur.

Su kürünün yeterince yapılmaması betonda basınç dayanımına benzer şekilde geçirimsizlik özelliklerini de etkilemektedir. Çimentonun su ile yaptığı reaksiyon sonucu ortaya çıkan hidrate ürünler (C-S-H) kapiler boşlukları doldurmakta ve ortamda yeterli nem bulunduğu sürece bu olay sürmektedir. Böylece zamanla, en azından kapiler boşluklardaki süreklilik azalarak beton geçirimsizliği düşmektedir. Ancak betonda yeterli geçirimsizlik sağlanabilmesi için kapiler boşlukların miktarının çok yüksek olmaması gerekir; dolayısı ile su/çimento oranının yüksek olduğu karışımlarda bu boşlukları hidrate elemanlarla doldurmak ve geçirimsiz bir beton elde etmek olası değildir

Ballim (1993) erken yaşlardaki kürün betonun oksijen geçirgenliği ve su emmesi üzerine etkisini incelemiş ve yetersiz kür koşullarında geçirgenliğin 50 kat artabileceğini gözlemiştir. Aynı çalışmada, geçirimsizliği artırmak için su/çimento oranı kadar, giderek ondan daha fazla etkili olan faktörün kür süresi olduğu kaydedilmiştir. Ho ve arkadaşlarınca (2003) gerçekleştirilen çalışmada, erken yaştaki

su kuru süresinin 1 günden 7 güne çıkarılması durumunda beton kalitesinin (dayanıklılık açısından) 2 kat, 28 güne çıkarılması durumunda ise 4 kat arttığı gözlenmiştir. Kür süresi 28 gün yerine 91 güne uzatıldığında ise kalite 2 kat artmıştır. Senbetta ve Scholer (1984) 1 gün su küründe tutulan betonun 3 gün tutulanlara göre 4 kat, 5 gün kür tutulanlara göre ise 8 kat daha geçirimli olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, bağıl nemin betonun dayanıklılık özelliğine (kalitesine) etkisi de incelenmiş ve düşük bağıl nemde tutulan betonların çok uzun süreler sonunda bile erken yaşlarda standard su kürü uygulanan betonların düzeyine erişemeyeceği belirtilmiştir

Dias ise (2000) 1 gün su kürü uygulamanın hiç uygulamamaya göre kılcallık katsayısını yarı yarıya düşürdüğünü, 7 günlük kür uygulanması durumunda üçte birine, 28 gün sonunda ise havada tutulan aynı betonun kılcallık katsayısının yaklaşık beşte birine kadar azaldığını saptamıştır. Bir başka çalışmada yetersiz kür uygulamasının %10-20 oranında dayanım azalmasına ve yaklaşık 20 ila 40 yıla karşılık gelen %30-60 oranında hizmet süresinde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.2) (Bentur ve Mitchell, 2008).



Şekil 2.2: Karbonatlaşma ve Klorür Etkisinde Korozyon Durumu İçin Hesaplanmış Hizmet Süreleri

Dayanıklılığın betonun bir özelliği değil belli şartlar altındaki davranışı olduğu belirtilmiştir (Nilsson, 2003); bu nedenle nicel bir kavram değildir. Mühendislik açısından daha anlaşılabilir olması için tüm hasar mekanizmalarının sayısal ifadelerini birarada değerlendiren hizmet süresi kavramı söz konusu belirsizliği ortadan kaldırmıştır. Hizmet süresinin belirlenebilmesi için yük taşıma kapasitesinin dışında estetik, güvenilirlik, kabul edilebilir hasar oluşumu gibi sınırların da belirlenmesi gereklidir.

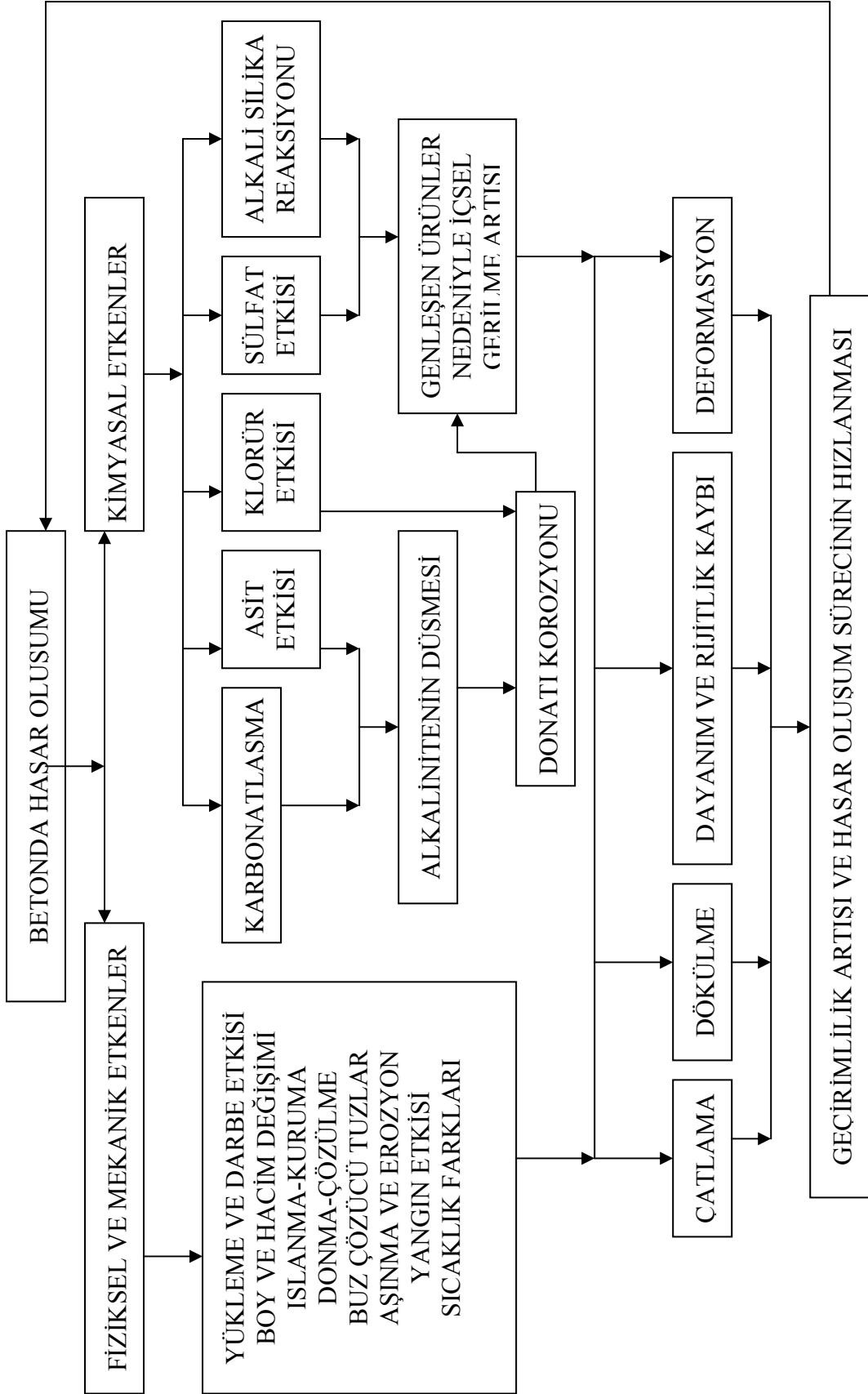
2.4 Betonda Hasar Oluşumu

Beton birçok yoldan hasar görebilir. Çevresel etkilerden kaynaklanan hasarların kimyasal ve fiziksel olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştiği düşünülebilir. Donatı korozyonu ise bu iki süreç sonunda gerçekleşen elektrokimyasal bir olaydır. Kimyasal hasarlarda yabancı bir madde ile beton bileşenleri arasında gerçekleşen bir reaksiyon sonucunda açığa çıkan ürünlerin genleşmesi ya da beton bileşenlerinin çözülerek bütünlüğünün kaybolması söz konusudur. Asit ve sülfat etkisi, alkali-agrega reaksiyonu, karbonatlaşma gibi en çok görülen hasarlar bu gruptadır. Fiziksel hasarların başında donma etkisi ve çözücü tuz etkisi gelir. Bunların yanında yangın etkisi ile aşınma sonucu görülen hasarlar da fiziksel hasar sınıfında değerlendirilir Şekil 2.3'te betonda en çok görülen hasar oluşum etkenlerinden bazıları gösterilmiştir.

Yukarıda sınıflandırılan hasarların birçoğu fiziksel ve kimyasal tepkimelerin bir arada gerçekleşmesi ile meydana gelir. Diğer taraftan, sertleşmiş betonun geçirimsizliğinin, hasar veren yabancı maddelerin beton içerisine taşınma süreçlerini belirlemesinden dolayı, dayanıklılık ve hizmet süresi üzerinde hasar mekanizmalarından çok daha etkili olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle taşınma süreçlerinin en az diğer tepkimeler kadar derinlemesine incelenmesi gerekir.

2.4.1 Taşınma Süreçleri

Genel olarak betonun dayanıklılığını etkileyen su, agresif iyonlar ve karbondioksit ile oksijen gibi gazların beton içerisindeki hareketi 'geçirimsizlik' adı altında incelenmektedir. Difüzyon, emilme ve basınç altında penetrasyon olayları da bu kapsamda değerlendirilmektedir.



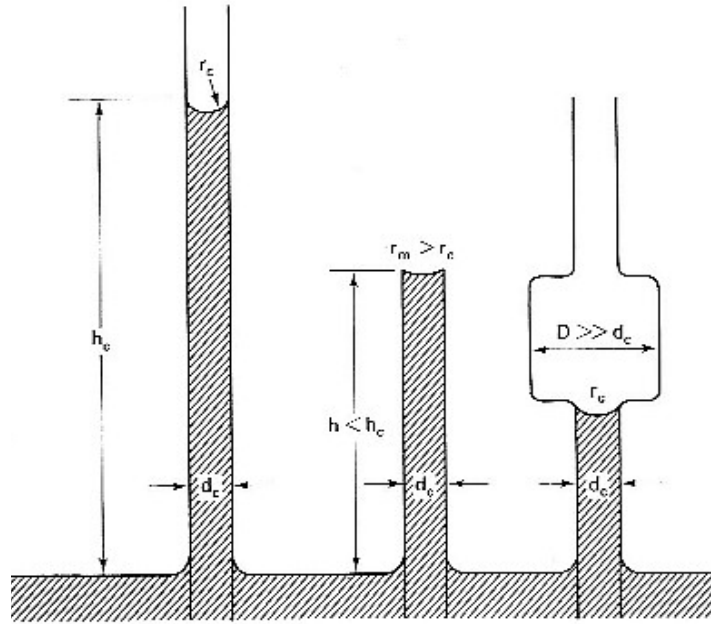
Şekil 2.3: Betonda Hasar Oluşumu Çeşitleri

2.4.1.1 Difüzyon

Atmosferde bulunan maddelerin beton içerisine taşınması, aradaki konsantrasyon farkından kaynaklanıyorsa buna difüzyon denir. Suda çözülmüş maddelerin difüzyonu (iyonik difüzyon) boşlukların suyla doygun olması durumunda hızlanırken gazların difüzyonunun en yüksek hıza ulaşması – gerçekleşecek reaksiyona bağlı olmak kaydıyla – betonun tam veya kısmen kuru olması durumunda mümkündür. Bu durumda gaz geçirimliliğinin iyonik geçirimliliğe oranla yaklaşık 4 merteye (10000 kat) daha hızlı gerçekleştiği saptanmıştır (**Papadakis ve diğ., 1991**).

2.4.1.2 Emilme

Beton yüzeyinin su ile teması durumunda içeriye girebilen su miktarına betonun su emmesi denir. Uygulaması daha kolay olması bakımından ağırlıkça hesaplanırsa da hacimce su emme miktarı betonun boşluk oranı hakkında daha fazla bilgi verir. Su emme deneyleri için tam kuru ağırlığa ulaşmanın yüksek sıcaklık gerektirmesi ve bunun da betonda çatlak oluşturması nedeniyle sadece niteliksel değerlendirmede kullanılmaktadır. Nicel değerlendirme yapmak için kılcal su emme, yüzeysel su emme (**BS 1881; Part 5, 1970**) gibi yöntemler, betonun doğal ortamındaki su emme süreçlerini daha doğru yansıttığı için tercih edilmektedir.



Şekil 2.4: Kılcal Su Emme

İki farklı malzemenin (hava ve su) sınır bölgesinde meydana gelen yüzey gerilimi nedeniyle ve sıvı ile kılcal boşluğa sahip malzemenin (beton) arasındaki kohezyona bağlı olarak, tüp şeklindeki boşluğun alt ucu ile su temas ettiğinde yerçekiminin tersi yönde emilme gerçekleşir. Buna kılcal su emme denir. Suyun yükselme miktarı kılcal boşluğun çapı ile ters orantılıdır (Şekil 2.4).

Betonun kılcal su emme özelliği, belirli zaman aralıklarında ağırlıkça ölçülen emilen su miktarının (Q) zamanın (t) kareköküyle arasındaki ilişkinin bulunmasıyla saptanır:

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (2.4)$$

Burada A numune kesitini ve k serbest su içermeyen beton için kılcallık katsayısını gösterir.

2.4.1.3 Geçirimsizlik

Bir basınç farkı altında sıvı veya gazın beton içerisine girişine geçirimsizlik denir. Betonun geçirimsizliği, basınç altındaki sıvı veya gaz geçişinin kararlı hale gelmesinin (steady state) ardından birim zamanda birim alandan geçen sıvı veya gaz miktarının tespit edilmesi sonucu geçirimsizlik katsayısının hesaplanması ile belirlenir:

$$Q = k \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2.5)$$

Burada ΔP numunenin iki ucu arasındaki basınç farkını, Δx numune yüksekliğini, Q birim alandan geçen akışkanın miktarını, k ise geçirimsizlik katsayısını göstermektedir. Özellikle su geçirimsizliğinin uzun sürmesi, geçen miktarın toplanması aşamasındaki sıkıntılar ve basınçlı suyun uzun süre içerisinde beton boşluk yapısını değiştirme ihtimali (hidratasyon, süzülme vb.) gibi durumlar nedeniyle, oluşturulan standart deneyde (TS EN 12390-8, 2002) sabit basınç altında belirli bir süre içerisinde beton içerisine su işleme derinliği ölçülmektedir.

2.4.2 Karbonatlaşma

Karbonatlaşma, karbondioksitin difüzyonu ile serbest kireçle arasındaki kimyasal tepkimenin birarada gerçekleştiği sürece denir. Atmosferde %0,03 oranında bulunan CO₂, kapalı mekanlarda %1'e kadar yükselebilmektedir. Bu nedenle betonarme binaların iç kısımları başta olmak üzere her an karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşmektedir.

Temel olarak su ile birleşerek karbonik asit oluşturan karbondioksitin hidratasyonun en zayıf unsuru olan Ca(OH)₂ ile reaksiyonu sonucu CaCO₃ meydana getirmesi anlamına gelen karbonatlaşmanın, yüzeyde sertlik ve dolayısıyla dayanım artışı ile geçirimsizliği azalttığı görülse de **(Claisse ve diğ., 1999)** asıl olarak alkalinitenin azalması sonucu donatı korozyonuna neden olması en belirgin özelliğidir. Bundan dolayı bu konu ile ilgili detaylı bilgi dördüncü bölümdeki 'Betona Gömülü Donatı Korozyonu' bahsinde verilecektir.

2.4.3 Asit Etkisi

Beton, alkali yapısı nedeniyle asit etkisine karşı duyarlıdır. Çimento hamuru içerisinde ilk olarak Ca(OH)₂ (kalsiyum hidroksit) asit ile tepkimeye girerek çözülür (2.4). Kireçtaşı veya dolomit esaslı agregalar da asitlerden etkilenirler.



Burada *X* asitin negatif iyonunu göstermektedir. Nitrik, hidroklorik ve nitrik asitlerin kalsiyum tuzları suda çözülebilir olması nedeniyle geçirimsizliği azaltmadıklarından, bu asitler tuzları suda çözünmeyen fosforik aside oranla daha fazla zarar verirler. Sülfirik asit ise hem asit etkisinde oluşan hasarlara hem de sülfat etkisine neden olur **(ACI Committee 201, 1992)**.

2.4.4 Sülfat Etkisi

Betonun sülfatlı ve nemli ortamlara maruz kalması durumunda sülfat iyonlarıyla çimento hamuru arasında gerçekleşen bir dizi kimyasal reaksiyonu tanımlamak için 'Sülfat Etkisi' terimi kullanılır. Dış ortamda bulunan sülfatların beton içerisine girmesi halinde, çimentonun C₃A bileşeni (daha doğrusu monosulfoaluminat) ile

reaksiyona girerek etrenjit oluşumuna neden olurlar. Sertleşmiş betonda, bu bileşiğin oluşumu sırasında meydana gelen hacim artışı sonucu çatlama, dağılma ve parçalanma gibi önemli hasarlar görülür. Yeraltı ve deniz suyu gibi beton yüzeyine temas eden ve sülfat içeren ortamlarda en çok sodyum sülfat, potasyum sülfat, magnezyum sülfat ve kalsiyum sülfat şeklinde bulunur. Bunların arasında en etkili olanın C-S-H ile iyon değişimine yol açan magnezyum sülfat olduğu bilinmektedir (Neville, 2004).

Sülfatlı ortamlarda yapılacak betonarme yapılarda geçirimsizliğin yanında C_3A içeriği düşük çimento da kullanılmaktadır. TS EN 206-1 (2002) standardında ortam şartlarına göre çevre etki sınıfları oluşturulmuş ve her bir etki sınıfı için beton üretiminde ve kullanılacak malzemelerde aranacak kriterler belirlenmiştir. Bu standarda göre sülfatlı ortamlarda sülfata dayanıklı çimento (C_3A miktarı %5'ten küçük) önerilmektedir.

2.4.5 Alkali – Silika Reaksiyonu

Çimentoda bulunan alkali hidroksitler ile genellikle agregadan gelen reaktif silisin oldukça yavaş bir şekilde birleşmesi ile meydana gelen alkali-silikat jellerinin ortamda su bulunması durumunda şişerek beton yüzeyinde 'harita' şeklinde tanımlanan rasgele ve yaygın çatlakların görülmesiyle sonlanan sürece alkali-silika reaksiyonu denir. Gecikmiş etrenjit oluşumu, agregaların ısıl genişmesi, kuruma rötresi gibi nedenlerle de benzer çatlak oluşumu görüldüğünden tespit edilmesi oldukça zordur (Lawrence, 2004). Beton içerisindeki nem durumunun yanında ortam sıcaklığı da reaksiyonun miktarını olmasa da hızını belirleyen önemli bir etkidir.

2.4.6 Klorür Etkisi

Klorürler, beton içerisine üretim sırasında bileşenler aracılığıyla girebildiği gibi genellikle dışarıdan çözücü tuzlardan veya deniz suyundan gelir. Beton içerisine giren klorür ilk olarak C_3A bileşeni tarafından bağlanarak Friedel tuzunu oluşturur. Friedel tuzu oluşumunun betona herhangi bir zararı söz konusu değildir; C_3A 'nın klorür bağlama özelliğini göstermektedir.

Deniz suyu etkisi altında olup içerisinde çelik donatı bulunmayan betonların performanslarında hizmet süreleri boyunca beklenmeyen bir değişiklik görülmeyebilir. Ancak betonarme yapıların hizmet sürelerini belirleyen en önemli etkenler klorür girişi ve karbonatlaşmadır. Klorür iyonlarının etkisinde meydana gelen korozyon, karbonatlaşma etkisinden farklı olarak, bölgesel ve çukur oluşumu şeklinde gelişir. Bu nedenle kısa zamanda büyük miktarda donatı kesit kayıplarıyla karşılaşmaktadır. Dolayısıyla klorür etkisinde korozyon oluşumu yaklaşık 50 yıldır üzerinde en çok çalışılan dayanıklılık problemlerinin başında gelmektedir; konu ile ilgili detaylı bilgi dördüncü bölümde verilmektedir.

2.4.7 Donma–Çözülme Etkisi

Su donduğunda hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Soğuk iklim bölgelerinde ve kısmen veya tamamen suya doygun halde bulunan beton elemanlarda söz konusu genişleme sırasında ortaya çıkan iç gerilmelerle kılcal çatlaklar beton içerisine doğru ilerler. Sıcaklığın yükselmesinin ardından yeni oluşan çatlaklar da suya doygun hale gelir ve her donma aşamasında aynı olaylar tekrarlar. Bir süre sonra beton yüzeyinde dökülmeler şeklinde hasar görülür.

Donma-çözülme etkisine karşı dirençli olması için alınması gereken en önemli önlem standartlara uygun şekilde beton içinde hava kabarcıkları oluşturmaktır (hava sürüklemek). Hava sürüklenmiş betonlarda donma sırasında suya doygun boşluklardaki gerilmeye bağlı olarak ilerleyen çatlaklar sürüklenmiş hava kabarcıklarına rastladığında gerilme yok olacağından hasarın etkisi ve hızı azalmaktadır (**Eglinton, 2004**). Ayrıca düşük geçirimsizlik ve su emme miktarı diğer önlemler olarak düşünülebilir. Bu etki altında hasar oluşumu ilk olarak iyi yerleşmemiş bölgeler, ayrışma sonucu ortaya çıkan kusurlar, soğuk derz oluşan yerlerden başlayacağından bu hususlara dikkat edilmelidir.

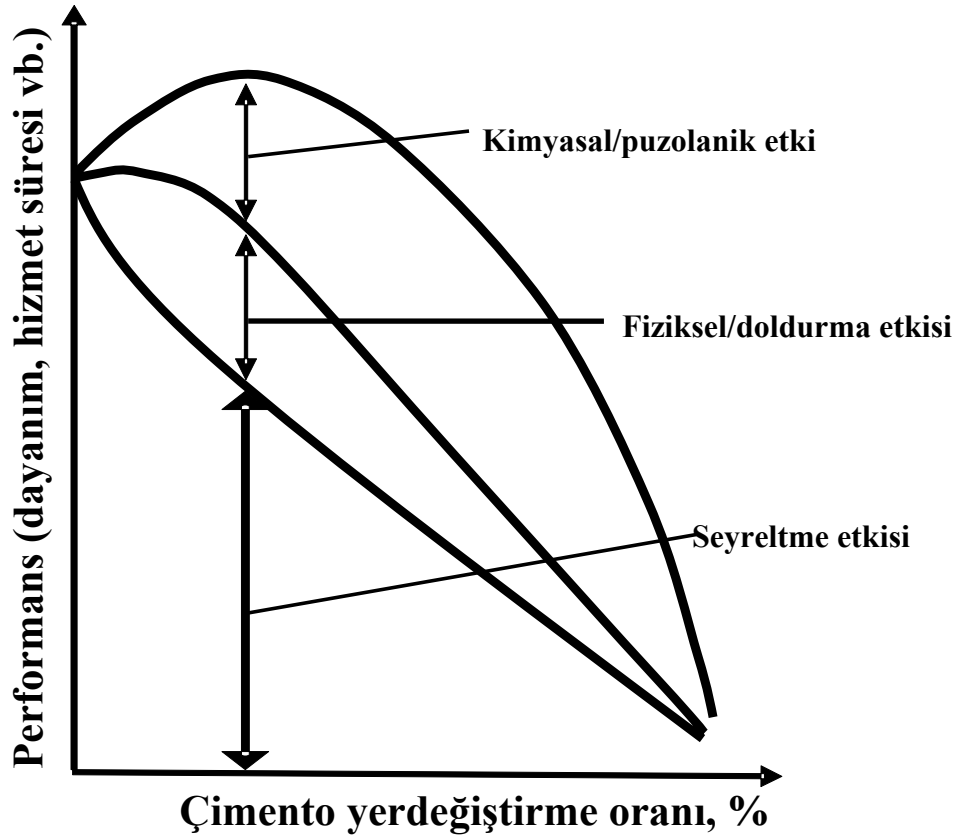
3. MİNERAL KATKILARIN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Yüksek oranda silis içeren, kendi başına çok az veya hiç bağlayıcılık özelliği olmayan, ince taneli, betona toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %20 ila %70'i gibi yüksek oranlarda katılan ve alkalilerle kimyasal tepkimeye giren malzemelere mineral katkılar veya puzolan denir. Çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) çözülebilir olmasından dolayı betonun en zayıf unsuru olarak tanımlanır. Mineral katkılarda bulunan aktif (amorf) silis, ortamda su bulunması halinde Ca(OH)_2 ile birleşerek daha yoğun ve çözünmeyen bileşikler (C – S – H) oluştururlar.

Uçucu kül, cüruf ve silis dumanının her biri betona katıldığında görülen taze ve sertleşmiş özelliklerdeki değişiklikler birbirinden çok farklı olmakla birlikte bir çeşit mineral katkının (puzolan) kaynağına, inceliğine, kimyasal bileşimine göre beton içerisindeki davranışında da farklılıklar görülmektedir. Bu nedenle beton içerisine katılma miktarları da puzolana göre değişir. Silis dumanı çimentoya göre çok ince olması nedeniyle en az oranlarda, uçucu kül daha yüksek, yüksek fırın cürufu ise en yüksek oranlarda kullanılmaktadır. Örneğin, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu taze betonun su ihtiyacını azaltırken (ya da akıcılığını artırırken) silis dumanı artırmaktadır. Diğer taraftan, kütlece çimento ile bire bir yerdediştirme söz konusu olduğunda, genel olarak ilk ikisi betonun 28 günlük basınç dayanımında azalmaya, sonuncusu artışa neden olduğu bilinmektedir. Kil, şist, opal, volkanik tüf ve sünger taşlarının yapısındaki karbonatların oksitli bileşenlere dönüşmesi amacıyla kalsine edilmesinden sonra çok ince şekilde öğütülerek betonda kullanılan doğal puzolanlar da hem özelliklerinde görülen değişkenlik hem de beton özellikleri üzerindeki etkileri bakımından uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna benzemektedir (**Pekmezci, 2000**).

Betonda çimento yerine kullanılan malzeme özelliklerin dayanım ve performans üzerindeki etkileri Şekil 3.1'deki gibi sınıflandırılmaktadır (**Cyr ve diğ., 2005**). Çimento yerine kullanılan fakat aynı özelliklere sahip olmayan herhangi bir

malzemenin yerdeğiştirme oranı arttıka ilk olarak seyreltme etkisi görülür. Ancak bu malzeme çimentoya göre çok daha ince boyutta ise, imento taneleri arasındaki boşluklara yerleşeceğinden dolayı düşük yerdeğiştirme seviyelerinde beton performansını düşürmez, belli bir oranı geçtikten sonra azalma görülür. Çimento yerine kullanılan malzemenin mineral katkı olması durumunda ise belirli bir orana kadar beton özelliklerini iyileştirdiği, bu optimum seviyeden sonra performansın azalacağı söylenebilir. Bu optimum seviye puzolanın etkinliğine bağlıdır. Uygulamada kullanılacak puzolanın en yüksek performansını yakalamak oldukça önemli olduğundan bu konuda yapılmış birçok çalışma mevcuttur (**Pekmezci ve Akyüz, 2004**) (**Babu ve Kumar, 2000**) (**Babu ve Rao, 1996**) (**Papadakis ve Tsimas, 2002**).



şekil 3.1: Mineral Katkı Miktarı ve zelliklerinin Beton Performansına Etkisi

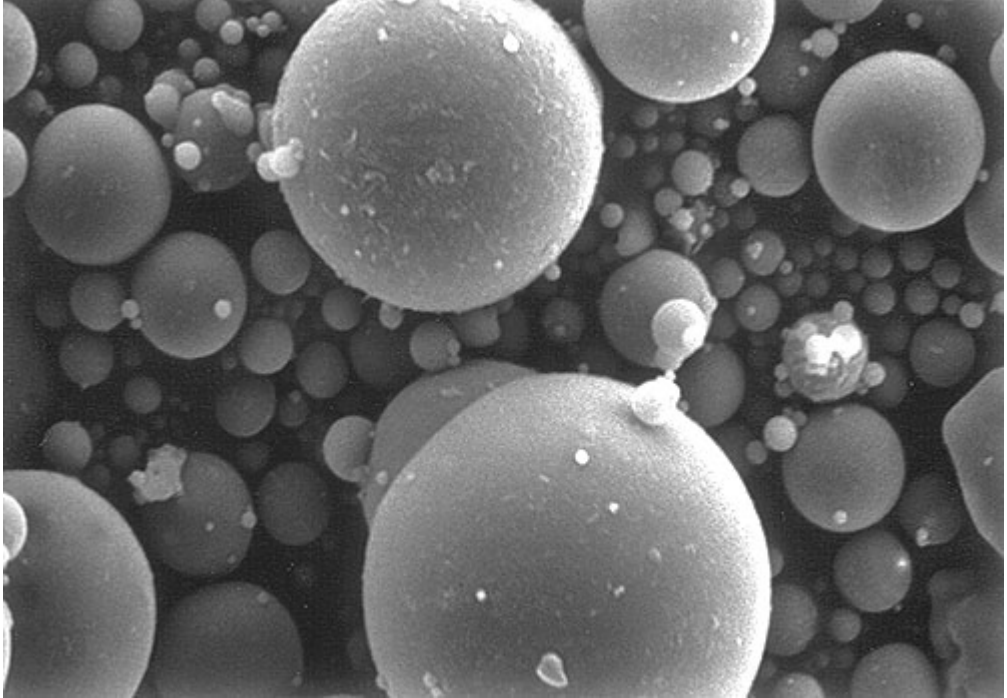
Beton teknolojisinde en sıklıkla kullanılmakta olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanının beton özelliklerine etkisi ayrı ayrı aşağıda verilmiştir.

3.1 Uçucu Kül

Kömürle çalışan termik santrallerde baca gazları ile taşınan ve mekanik-elektrostatik yöntemlerle toplanarak doğaya karışması engellenen atık malzemelere uçucu kül denir. Dünyada açığa çıkan ortalama 600 milyon ton uçucu külün 13 milyon tonu Türkiye kaynaklıdır (Türker ve diğ., 2003).

3.1.1 Fiziksel Özellikleri

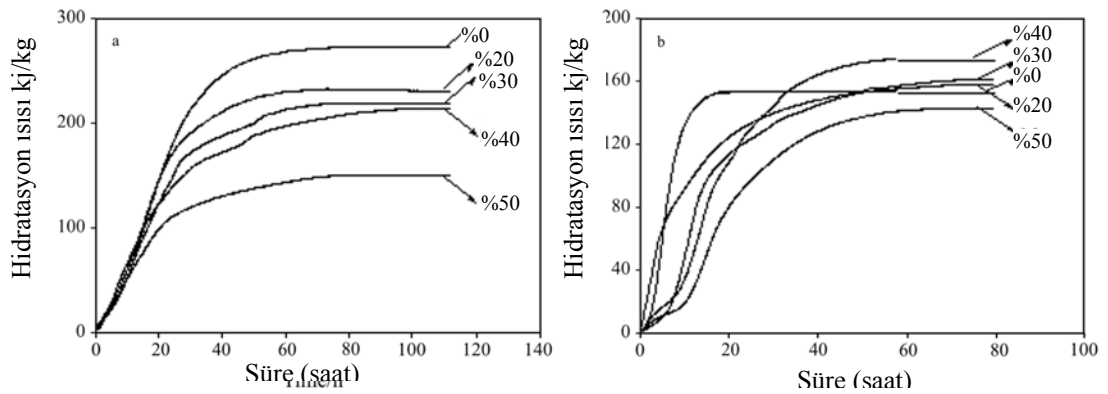
Düzeltilmiş şekilde yayınlanmış olan uçucu kül standardında (TS EN 450-1, 2008) betonda kullanılabilmesi için bazı kriterler getirilmiştir. Bu standarda göre mineral katkı olarak kullanılacak uçucu külün 45 mikron elek üzerinde kalan miktarı N veya S tipi olmasına bağlı olarak kütlece sırasıyla %40 veya %12'yi aşmaması, aktivitesi 28 ve 90 günde yine sırasıyla külsüz karışımın basınç dayanımının %75 ve %85'inin altına düşmemesi, priz başlama süresinin 120 dakikadan fazla gecikmemesi ve S tipi için referans karışımın su içeriğinin en fazla %95'i ile aynı kıvamda üretilebilmesi gereklidir.



Şekil 3.2: Uçucu Kül Tane Şekli

Tane boyutu yaklaşık 50 mikrondan küçük olan uçucu kül taneleri Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kusursuz küresel şekildedir. Bu özelliği sayesinde betonun akıcılığını arttırarak su ihtiyacını azaltır. Ayrıca hem beton içerisinde kolayca dağılarak bir su azaltıcı kimyasal katkı gibi betonun homojenliğine katkıda bulunurlar (**Malhotra ve Mehta, 2002**) hem de viskozitesi yüksek, terlemesi düşük bir beton üretimini sağlarlar. Yapılmış olan bir çalışmada uçucu külün %20’ye kadar su azaltma etkisi tespit edilmiştir (**Jiang ve Malhotra, 2000**).

Ekzotermik bir reaksiyon olan çimento hidrasyonu sırasında yaklaşık 500 Joule/gr enerji açığa çıkar (**Lewis ve diğ., 2003**). Betonun ilk yaşlarda açığa çıkardığı ısı başta kütle betonlarında meydana gelebilecek çatlak oluşumu ve dolayısıyla dayanıklılığı üzerinde etkili bir faktördür. Aynı zamanda betonun priz süresi de önemli ölçüde etkilenir.



Şekil 3.3: Uçucu Kül Miktarının Hidratasyon Isısı Üzerine Etkisi

Yakın zamanda yapılmış (**Wang ve Yan, 2006**) (Şekil 3.3) uçucu kül dozajının hidrasyon ısısı üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, yüksek su/bağlayıcı oranlarında ortamdaki tüm çimentonun hidrate olması mümkün olduğu koşullarda artan uçucu kül miktarının toplam çıkan ısıyı önemli ölçüde düşürdüğü, yeterli su bulunmaması durumunda ise yaklaşık ilk 18 saatten sonra çimentonun daha fazla hidrate olamadığı için 80 saat sonundaki toplam çıkan ısı miktarında küllü karışımların bazılarının altında kaldığı tespit edilmiştir. Ancak düşük su/bağlayıcı oranlarında, külsüz karışımlarda ilk 18 saat içinde çıkan ısının küllü karışımlara oranla çok daha yüksek olması uçucu külün priz süresi üzerine etkisinin düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen betonlarda çok daha fazla olduğunu göstermektedir.

Kül içermeyen betonlarla aynı dayanıma sahip uçucu küllü betonların elastisite modülleri de aynı seviyede olmaktadır. Aynı çalışmada (**Sata ve diğ., 2007**) toplam bağlayıcı dozajı ve su/bağlayıcı oranı aynı olan betonlarda kül kaynağına bağlı olarak belirli bir seviyeye kadar basınç dayanımında artış, daha sonra azalma meydana geldiği ancak yerdeğiştirme seviyesi %40 oranına kadar artan betonlarda basınç dayanımının hiçbir yaşta şahit betonun altına düşmediği belirtilmiştir.

3.1.2 Beton Dayanıklılığına Etkisi

Beton üretiminde kullanılan malzemeler dayanıklılık bakımından değerlendirilerek seçilmelidir. Günümüzde uçucu kül başta olmak üzere puzolanlar kullanılmadan üretilen betona rastlamak artık pek mümkün değildir. Çünkü mineral katkı içermeyen betonlar içerenlere kıyasla daha yüksek maliyete neden olmanın yanında dayanıklılık açısından da çok daha zayıftır (**ACI Committee 226, 1991**).

Betondaki kalsiyum hidroksitlerle birleşerek kalsiyum silikat hidrateler oluşturan uçucu kül geçirimsizliği azaltarak betona zarar verebilecek maddelerin girişini sınırlar (**Keck ve Riggs, 1997**). Böylece küllü betonlar, aynı su/bağlayıcı oranına sahip ve sadece Portland çimentosu ile üretilen betonlara nazaran ilk günlerde daha geçirimsiz olsalar da kür süresinin uzamasıyla çok daha geçirimsiz hale gelirler.

Birçok çalışmada uçucu külün alkali-silika reaksiyonunu önlemede etkili olduğu bulunmuştur (**Thomas ve diğ., 2007**) (**Malvar ve Lenke, 2006**) (**Meland, 1986**). Ancak bunun ne şekilde gerçekleştiği karmaşık yapısından dolayı tam olarak anlaşılamamıştır. Uçucu küllü betonun pH değerinin 13'ün altına kadar düşmesi, çimento miktarının azalmasıyla tepkimeye girecek alkali yoğunluğunun da azalması ve/veya puzolanik reaksiyonla birlikte alkalilerin C-S-H jelleri içine hapsolmesi, mekanizmayı açıklamaya çalışan teorilerin en akla yatkın olanlarıdır.

Uçucu küllü betonların aynı dayanıma sahip normal betonlara göre donma-çözülme etkisine karşı direncinde önemli derecede bir farklılık görülmemiştir. Ancak söz konusu etki durumunda dayanıklılığı belirleyen hava sürüklenme işlemiyle kullanılan kimyasal katkıların verimliliğini düşürdüğü bazı çalışmalarda görülmüştür (**Neville, 2004**).

Mineral katkıların Ca(OH)_2 içeriği bakımından karbonatlaşmaya karşı Portland çimentosuna göre daha dayanıksız olduğu düşünülmektedir çünkü puzolanlı betonlarda hem çimento dozajı azalmakta, hem de mevcut çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit puzolan tarafından bağlanmaktadır. Bunun üzerine bir de mineral katkı için çok daha önemli olan kür uygulamasının yetersizliği söz konusu olursa olumsuz sonuçlarla karşılaşılma olasılığı yükselir **(Sisomphon ve Franke, 2007)**. Yüksek oranda kireç içeren uçucu küllerin kullanılması durumunda Portland çimentosuna göre daha iyi sonuçlar elde edilmemekle birlikte karbonatlaşma hızı daha düşük olmaktadır.

Çimento içerisinde bulunan C_3A bileşeni gibi uçucu kül içerisindeki alüminli bileşiklerin de klorür bağlama yeteneğinden bahsedilse de **(Lewis ve diğ., 2003)**, uçucu küllü betonun geçirimsizliği, klorür ve sülfat etkisine karşı direncini belirleyen asıl etkidir. Bağlayıcı dozajının %40'ı uçucu kül veya taştözü olan kendiliğinden yerleşen betonların geçirimsizliklerinin incelendiği bir çalışmada **(Boel ve diğ., 2007)** birincisinin geçirimsizliği, kılcallığı, buhar difüzyonu ve gaz geçirimsizliği ikinciye nazaran sırasıyla %40, %33, %70 ve %15-20 oranlarında azalmıştır.

Uçucu küllerin özellikle klorür etkisinde betona gömülü donatı korozyonu oluşumunda etkili olduğu bilinmektedir. Paspayı ve su/çimento oranının uçucu küllü beton içerisine yerleştirilmiş donatı korozyonuna etkisinin incelendiği bir çalışmada **(Chalee ve diğ., 2007)**, 4 yıl sonunda korozyon başlaması için gerekli paspayı kalınlığı üzerine su/bağlayıcı oranı etkisinin artan uçucu kül ikamesiyle azaldığı tespit edilmiştir. Aynı çalışmada yaklaşık 40 mm paspayına sahip normal portland çimentosu ile üretilen betonlarda 4 yıldan önce korozyon görülmemesi için 0,45 su/bağlayıcı oranı üst sınır olarak gösterilirken, %25-30 oranında uçucu kül bulunması durumunda bu sınır 0,65 seviyesine kadar yükselmiştir. Benzer şekilde, uçucu küllü betonların normal betonlara kıyasla korozyon oluşum direncinde çok daha üstün nitelikte olduğunu gösteren çok sayıda çalışma bulunmaktadır **(Choi ve diğ., 2006) (Moon ve Shin, 2006) (Sujjavanich ve diğ., 2005) (Thomas ve Matthews, 2004)**.

3.1.3 Kürün Önemi

Uçucu küllü betonlarda istenilen dayanım, çatlak oluşumuna karşı direnç ve dayanıklılık için en az ilk 7 gün boyunca uygun şekilde kür uygulanmalıdır. Portland çimentosunun hidratasyonu sıcaklık 10°C'nin altına düşmediği sürece ilk 7 gün içerisinde büyük oranda tamamlanır. Betonun yerleştirilmesinden sonraki ilk günlerde açığa çıkan ısı ve nemin kaybolması engellendiğinde puzolanik reaksiyonun hızlanması için kullanılabilir. Daha sonra ortamda yeterli nemin bulunması durumunda şantiye şartlarında bile bir yıl boyunca dayanım ve geçirimsizliğin olumlu yönde geliştiği görülmüştür (**Malhotra ve Mehta, 2002**). Sıcak iklime sahip bölgelerde ise yine ilk 7 gün süresince beton yüzeyinin ıslak malzeme ile kaplamak gibi yöntemlerle nemli tutulması yeterli olacaktır.

Puzolan içeren betonlar yetersiz kür koşullarından, normal Portland çimentolu betonlara göre daha fazla etkilenmektedirler. Thomas ve arkadaşlarının (**1989**) gerçekleştirdikleri çalışmada, uçucu küllü betonların kül içermeyen karışımlardan daha uzun süre su kürüne tutulmaları ve uçucu kül oranı arttıkça bu sürenin uzatılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Normal çimentolu betonlarda 28 gün su içinde tutulan numunelerin oksijen geçirimsizlik katsayısının, 1 gün su kürü uygulanmış betonlara göre yaklaşık 6 kat azaldığını belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, 7 gün su kürü 1 günlük küre göre geçirimsizliği %50 düşürmüştür. Uçucu küllü karışımlarda ise kül oranı ile birlikte geçirimsizlik azalmış ve %15 uçucu kül (F tipi) içeren betonların 28 gün su kürü görmüş numunelerinde geçirimsizlik, 1 gün kür görmüşlere göre 10 kat azalmıştır. Benzer şekilde, Shafiq ve Cabrera (**2004**) da yüksek oranda (%40 ve %50) uçucu kül içeren betonların su içerisinde tutulduğu her sürenin dayanıklılığı olumlu yönde değiştirdiğini belirlemişlerdir.

3.2 Yüksek Fırın Cürufu

Ondokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında hidrolik bağlayıcılık özelliği keşfedilen yüksek fırın cürufu (YFC) aynı yüzyılın sonlarına doğru Portland çimentosu ile birlikte çimento üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. İlk yüksek fırın cürufu standardı ise 1923 yılında İngiltere'de hazırlanmıştır.

Yüksek fırınlarda yapılan demir üretimi sırasında açığa çıkan bir yan ürün olan YFC, doğadaki halinde bulunan ve demir üretiminde uzaklaştırılan silissi ve alüminli bileşiklerle birlikte kömürden de karışan bazı maddeler içerir. Cürufun beton teknolojisinde kullanılabilmesi için ergimiş haldeyken hızla soğutulması gerekir. Ancak su jetleriyle ani olarak soğutulduğunda camsı ve amorf yapıya sahip olan YFC böylece reaktif hale gelir. Daha sonra klinker ile aynı şekilde öğütülür. Öte yandan çapı 6 mm.den büyük cüruf tanelerinin iç kısımları püskürtülen suyla yeteri kadar hızlı soğumadığından genellikle hafif agrega olarak kullanılır.

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ulaşılabilirlik ve maliyet açısından mineral katkılar arasında en fazla tercih edilenlerdir. Çimento ile yerdeğiştirmek amacıyla kullanılacak YFC'nin öğütülmesi için gerekli enerji miktarı çimento için gerekli olanın %25'i kadardır (Song ve Saraswathy, 2006).

3.2.1 Yapısı ve Özellikleri

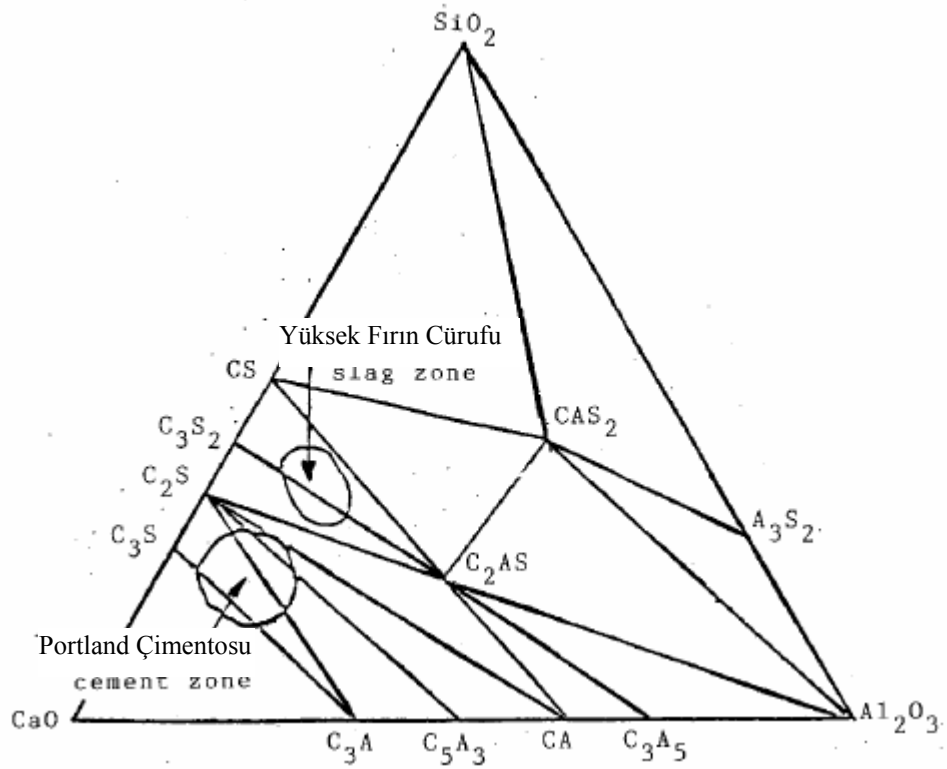
Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi başta cevher özellikleri olmak üzere birçok etkene bağlı olarak çok çeşitlilik gösterir. Havada, yavaş bir şekilde soğutulan yüksek fırın cürufunun ya çok az bağlayıcılık özelliği vardır ya da hiç yoktur. Hızla soğutularak camsı özellik kazanan cürufların ise silis içeriğine bağlı olarak bağlayıcılık kapasitesi değişir. Düşük oranda silis içeren cürufların bağlayıcı olabilmesi için alkali bir aktivatöre ihtiyaç duyulur. Çimento ilk akla gelen aktivatördür.

Genel olarak, cürufun alkalitesi ne kadar yüksekse hidrolik bağlayıcılığının da o derecede yüksek olduğu kabul edilir (Tokyay ve Erdoğan, 2003). Cürufun kimyasal bileşimi ve fiziksel özelliklerinin hidrolik aktivitesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla özellikle son 25 yıldır birçok çalışma yapılmış, ancak henüz tam ve açık olarak saptanamamıştır (Roy ve Idorn, 1983) (Moranville-Regourd, 2004). Kristal yapıdaki bileşenlerin artışıyla dayanımın azaldığı, camsı fazın ise dayanımı olumlu yönde etkilediği bilinmektedir.

Yüksek fırın cürufunun çimento ve su ile birlikte karıştırıldığında açığa çıkan hidrasyon ürünlerinin esas olarak Portland çimentosu ürünleriyle aynı olduğu kabul edilmiştir (ACI Committee 233, 1995). Şekil 3.4'te görülen üçlü grafikte YFC'nin

dikalsiyum silikat (C_2S) bölgesinde, Portland çimentosunun ise trikalsiyum silikat (C_3S) bölgesinde bulunmasına rağmen genel olarak aynı bölge içerisinde buldukları söylenebilir.

Sonuç olarak cürufun kimyasal bileşimi, bulunduğu ortamdaki alkali konsantrasyonu, cürufun camsı fazının miktarı, cüruf ile çimentonun incelikleri ve erken hidrasyon sürecindeki sıcaklık gibi çok sayıda ve karmaşık etkene bağlı olan cürufun bağlayıcılık özelliğinin ve performansının, birlikte kullanılacağı malzemelerle deney yapılarak kontrol edilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.4: Portland Çimentosu ve Yüksek Fırın Cürufunun CSH sistemi içerisindeki yeri

3.2.2 Beton Özellikleri Üzerine Etkisi

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun işlenebilirlik üzerindeki olumlu etkisi, tane yüzey durumu nedeniyle yaklaşık %3-5 civarında su azalttığı ve çimento ile yer değiştirme seviyesine bağlı olarak priz süresinde uzamaya neden olduğu bilinmektedir (Lewis ve diğ., 2003) (ACI Committee 233, 1995) (Meusel ve Rose, 1983).

Uçucu küle benzer şekilde, YFC içeren betonlarda hidrasyon ısısı düşük, dolayısıyla erken dayanım da sadece portland çimentosu içeren karışımlara oranla daha düşük seviyededir. Bu nedenle soğuk havada beton dökümünde tercih edilmemektedir. Diğer taraftan yüksek sıcaklıkta, cürufun reaktivitesi arttığından dolayı yüksek erken dayanım değerlerine ulaşılabilen ve YFC içermeyen betonlarda sonradan karşılaşılan geçirimsizlikle ilgili sorunlara pek rastlanılmamaktadır.

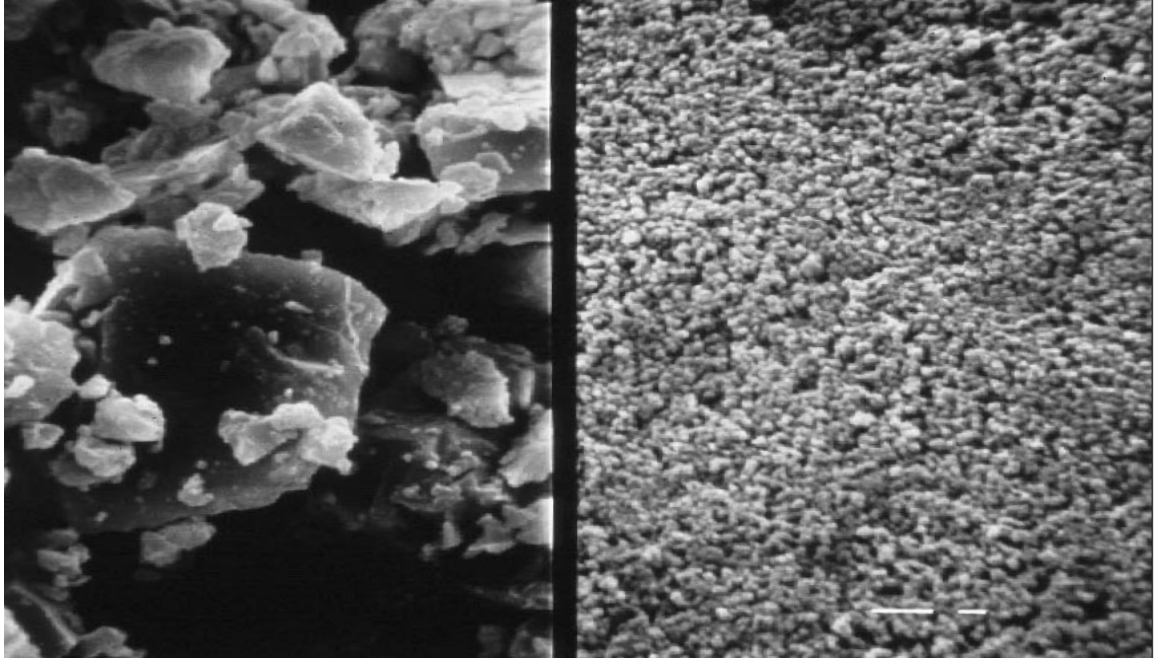
Birlikte kullanılan çimentonun inceliğinin daha yüksek olması salınan aktivatör (kalsiyum hidroksit) konsantrasyonunu artırdığından dolayı daha hızlı dayanım kazanmasını sağlamakla birlikte, daha ince cüruf sadece ileri yaşlardaki özelliklere olumlu katkıda bulunmaktadır (Neville, 2004). Çimentonun inceliğinin yanında çimentoda yüksek oranda C_3A ve alkali bulunmasının cürufu betonların dayanım kazanmasında etkili olduğu belirtilmiştir (Mayfield, 1990).

Mangat ve Molloy (1991) cürufun donatı korozyonuna karşı etkili olabilmesi için %40'dan daha yüksek oranlarda kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Aldea ve arkadaşları (2000) ağırlıkça yüksek fırın cürufu yer değiştirme miktarının %25 seviyesine kadar basınç dayanımında artışa, bu seviyeyi geçmesi durumunda ise azalmaya neden olduğunu, %50 oranından sonra kontrol karışımının da altına düştüğünü fakat iç yapı özelliklerini ve klorür işleme derinliğini, artan cüruf miktarının sürekli olumlu yönde değiştirdiğini gözlemlemiştir. Bir başka çalışmada (Thomas ve Bamforth, 1999) 100 yıllık bir servis ömrü göz önüne alındığında YFC veya uçucu kül ile üretilen betonların difüzyon katsayıları sadece portland çimentosu ile üretilenlere kıyasla 1-2 merteye (10-100 kat) daha düşük bulunmuştur. Diğer taraftan yüksek sıcaklıklara sahip iklim koşulları altında YFC kullanılan betonların geçirimsizlikleri ancak su küre uygulanması durumunda sadece portland çimentosu ile üretilen betonlardan daha düşük bulunmuştur (Robins ve diğ., 1992). Aynı basınç dayanımına sahip, cüruf içeren ve içermeyen betonların korozyon performansları incelendiğinde artan cüruf miktarının hem karbonatlaşma derinliğinde hem de korozyon hızı ve potansiyelinde önemli ölçüde azalmaya neden olduğu görülmüştür (Pal ve diğ., 2002). Üç farklı su/bağlayıcı oranı (0,26-0,30-0,34) kullanılan daha kısıtlı bir çalışmada ise %30 oranında YFC'nun çimento ile ikame edilmesi durumunda klorür geçirimsizlik katsayıları yaklaşık %50 oranında azalmıştır (Leng ve diğ., 2000).

3.3 Silis Dumanı

Silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde açığa çıkan atıkların işlenerek yan ürün haline getirilmesiyle elde edilen silis dumanı (silika tozu, mikrosilika), ilk olarak 1947 yılında, çevre korunması için uygulanan kısıtlamalar sonucunda zorunluluktan dolayı elde edilmeye başlanmıştır. Özellikle 1980’li yılların ardından, yine çevre politikaları nedeniyle çimentonun daha az kullanılması eğilimi ve daha da önemlisi, silis dumanının son derece ince yapısı ve %85’in üzerinde amorf yapısı (**Holland, 2005**) araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiş, bugüne kadar betonda kullanımı hakkında çok sayıda çalışma yapılmasına neden olmuştur (**Yeğınobalı, 2003**) (**Lewis ve diğ., 2003**).

Betona silis dumanı ilave edilmesi durumunda artan tane yüzey alanı nedeniyle aynı kıvamın sağlanması için daha fazla suya ihtiyaç duyulur; bu nedenle ancak süperakışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır. Diğer taraftan kohezyonda artış ve terlemede azalma görülür. Bu nedenle yüksek oranlarda çimento ile yer değiştirilmesi mümkün olmamaktadır. Uygulamada kütlece 3-4 birim çimento yerine sadece 1 birim silis dumanı kullanılması yeterli olmaktadır (**ACI Committee 234, 1996**).



Şekil 3.5: Aynı Derecede Büyütülmüş Portland Çimentosu (solda) ve Silis Dumanının (sağda) Görüntüsü

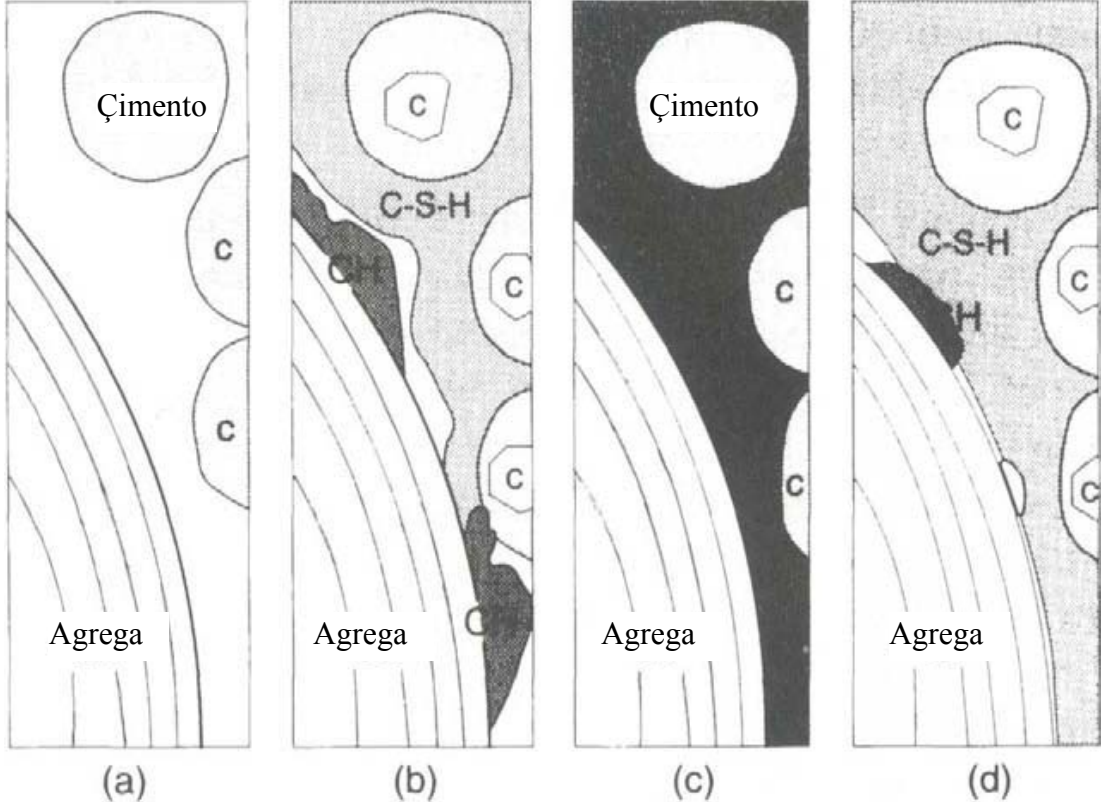
3.3.1 Beton Özellikleri Üzerine Etkisi

Silis dumanının betonda kullanıldığında sağladığı fiziksel ve kimyasal katkının temeli %95'inin tane boyutunun 1 mikrondan küçük ve ortalama çapın 0,15 µm civarında olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.5). Bu nedenle, yani yüksek tane yüzey alanı ve buna ek olarak yüksek silisyum dioksit konsantrasyonu dolayısıyla, silis dumanı diğer puzolanik malzemelere göre çok daha reaktiftir (**Fidjestøl ve Lewis, 2004**). Çimento hamurlarının boşluk suyu kimyası ve erken hidrasyon süreçlerinin incelendiği çalışmaların (**Diamond, 1983**) (**Christensen ve diğ., 1992**) sonuçlarına göre silis dumanının ilk anda çimentonun alkali salınımını ve hidrasyonunu hızlandırdığı, hemen ardından bunları büyük oranda bağlayarak betonun dayanıklılığını artırdığı söylenebilir. Silis dumanı katkısının hidrasyon ısı üzerine etkisinin incelendiği çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur (**Rahhall ve diğ., 2007**) (**Pinto ve Hover, 1999**).

Toplam bağlayıcı miktarının %15'inin silis dumanından meydana gelmesi durumunda her çimento tanesine yaklaşık 2 milyon silis dumanı tanesinin karşılık geldiği belirlenmiştir (**ACI Committee 234, 1996**). Tane boyutları arasındaki bu büyük fark sayesinde silis dumanı, çimento tanelerinin dolduramadığı boşluklara girerek daha yoğun, dolu bir beton elde etmeyi mümkün kılar. Birçok araştırmacı da silis dumanının en önemli etkisinin, betonun fiziksel olarak en zayıf unsurlarının başında gelen agrega – çimento hamuru ara yüzeyini kuvvetlendirmek olduğunu belirtmektedirler (**Bentz, 2000**) (**Taşdemir ve diğ., 1999**) (**Goldman ve Bentur, 1989**). Silis dumanının agrega – çimento hamuru ara yüzeyi üzerindeki etkisinin gösterildiği Şekil 3.6 incelendiğinde silis dumanının hem boyut itibarıyla boşlukları doldurduğu hem de agrega yüzeyinde biriken Ca(OH)_2 bileşiklerini içerdiği reaktif silis ile bağlayarak azaltıp, daha fazla C-S-H kristalleri ürettiği görülmektedir (**Bentur ve Cohen, 1987**).

Yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonlar başta olmak üzere genellikle özel betonlarda kullanılan silis dumanının dozajı, betonun kullanım amacına bağlı olarak Tablo 3.1'de verildiği şekilde değişebilir (**Lewis ve diğ., 2003**). Çimento ile yerdeğiştirme oranına bağlı olarak silis dumanı içeren betonların 28 günlük basınç dayanımlarında %10-20 arasında artış görülmüştür (**Mazloom ve diğ., 2004**). Bununla birlikte, aynı betonların basınç dayanımlarında 90 günden sonra herhangi

bir ilerlemeye rastlanmamıştır. Mazloom ve arkadaşları (2004), yüksek oranda yerdeğiştirmenin daha fazla akışkanlaştırıcı ihtiyacı doğurduğunu belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada 0,25 gibi çok düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen betonlarda artan silis dumanının artan çökme kaybına neden olduğu gösterilmiştir (Duval ve Kadri, 1998).



Şekil 3.6: Silis Dumanının Arayüzey Yapısı Üzerine Etkisi (a) ve (b) Silis Dumanı İçermeyen Taze ve Sertleşmiş Beton, (c) ve (d) Silis Dumanı İçeren Taze ve Sertleşmiş Beton (ACI Committee 234, 1996)

Tablo 3.1: Beton Özelliklerine Bağlı Olarak Seçilebilecek Silis Dumanı Dozajları (Lewis ve diğ., 2003)

Beton Özelliği	S. Dumanı Dozajı (%-toplam bağlayıcıya göre)
Normal	4-7
Yüksek performanslı	8-10*
Yüksek kimyasal dirençli	10-12*
Su altı uygulaması	10-15
Pompalanabilir	2-5

* : Özel durumlarda bir miktar daha yükseltilebilir

Silis dumanı katkısının beton dayanıklılığı üzerine etkisinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, yerdeğiştirme seviyesinin özellikle %8 oranını aşması

durumunda beton geçirimsizliğinde önemli derecede azalma meydana geldiği, ve bu azalmanın %12 oranına kadar devam ettiği, ancak %12'den fazla silis dumanı içeren betonlarda artan su ihtiyacının geçirimsizliği olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir **(Song ve diğ., 2007)**.

Dayanıklılık açısından silis dumanı katkılı betonların uzun süre içerisindeki performanslarını inceleyen Lessard ve arkadaşları **(1992)**, 10 yıllık hizmet süresi dahilinde kendisinden beklenen özellikleri koruduğunu görmüşlerdir. Kayali ve Zhu **(2005)** tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise 70 MPa basınç dayanımına sahip %10 oranında silis dumanı içeren betonarme döşemelerde yapılan ölçümlerde çok düşük korozyon hızları ve yarı-hücre potansiyel değerleri bulunmuştur. Ayrıca bu döşemeler klorür etkisi altında dahi uzun süre boyunca söz konusu değerleri korumuşlardır. Yayımlanmış çalışmalar incelendiğinde, klorür etkisinde korozyon başlama süresinin, silis dumanlı betonlarda normal betonlara göre çok daha uzun olduğu ve bu sürenin betonun boşluk suyu kimyasından daha fazla bileşimi ve boşluk oranına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır **(Dotto ve diğ., 2004) (Page ve diğ., 1986) (Mangat ve Molloy, 1991)**.

Çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit ve diğer alkalilerin tamamını bağlayabilecek kadar silis dumanı bulursa bile betonun pH değeri en fazla 12'ye kadar düşmektedir **(Lewis ve diğ., 2003)**. Başka bir deyişle, silis dumanı nedeniyle beton boşluk suyu alkalinitesi, içerisindeki çelik donatının üzerinde bulunan pasivasyon tabakasının zarar göreceği seviyeye kadar düşmemektedir. Öte yandan silis dumanının yüksek derecede alkali bağlama yeteneği sayesinde alkali-silika reaksiyonunun oluşma riski büyük oranda azalmaktadır **(Thomas ve diğ., 2007)**

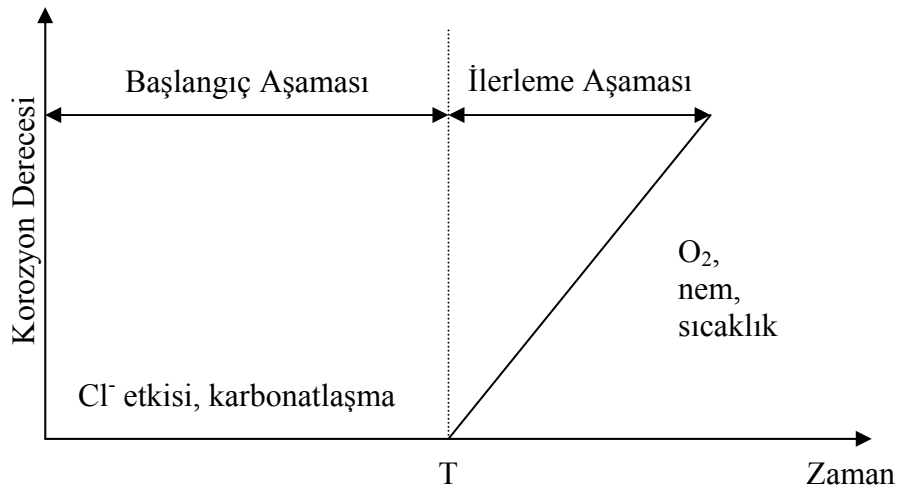
4. BETONA GÖMÜLÜ DONATI KOROZYONU

Beton, içerisindeki çelik donatıyı hem kimyasal hem de fiziksel olarak korumaktadır. Atmosferde bulunan asidik özellikteki gazların etkisinde kalmamış betonun kimyasal koruyuculuğu, çimento hidrasyonu sırasında açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve NaOH , KOH bileşenlerinden kaynaklanan ve pH değeri 13 civarında olan yüksek alkalinitesinden ileri gelir (Alekssev, 1993). Bu ortam çelik donatı yüzeyi üzerinde kalıcı bir koruyucu pasivasyon tabakasının oluşumunu ve bu tabakanın sürekliliğini sağlar. Çelik donatı üzerindeki beton tabakasının fiziksel etkisi ise pasivasyon tabakasının doğrudan veya dolaylı yollardan bozulmasına sebep olabilecek oksijen, CO_2 gibi gazların ve SO_3 , Cl gibi iyonları ve suyun girişini geçirimsizlik özelliği sayesinde engellemesidir. Diğer bir deyişle çelik donatının pasif durumunun kalıcılığı paspayı kalitesine ve kalınlığına bağlıdır. Karbonatlaşmanın oluşmaması ve klor etkisi bulunmaması halinde beton içerisindeki yüksek alkalın ortam bozulmayacağından korozyon meydana gelmez. Çelik üzerinde oluşan koruyucu pasif tabaka bir korozyon ürünü olmakla beraber çok düşük çözünme hızına sahiptir. Yani tam bir yalıtkan olmasa da çok küçük bir akımın geçmesine izin verir ve bu akım ihmal edilebilir düzeyde, yavaş yavaş tabakayı inceltir.

Betonun fiziksel özellikleri yeterli olmadığında veya bir şekilde sözü edilen maddelerin girişi engellenemediğinde, ya kimyasal koruyuculuğu sağlayan alkalinitenin ana bileşeni olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in karbonatlaşarak bazikliğini kaybetmesiyle ya da klorür iyonlarının doğrudan etkisiyle pasivasyon tabakası hasar görür.

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

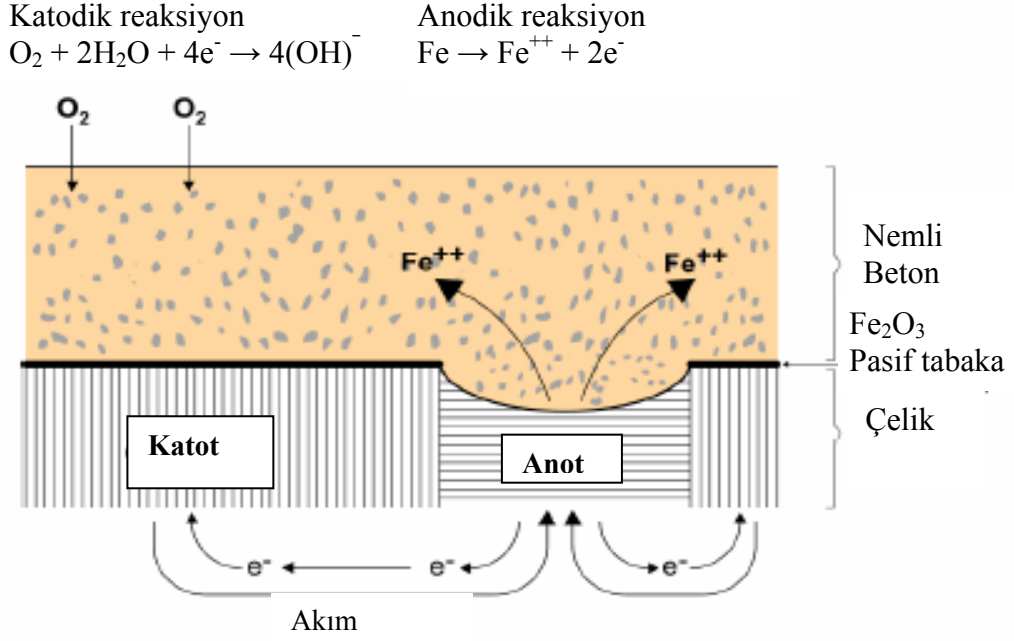
Tuutti (1982) tarafından iki aşamalı bir süreç olarak modellenmiş olan donatı korozyonuna bağlı betonarme yapı hizmet süresi, birçok araştırmacı tarafından kabul görmüştür. Basitleştirilmiş hali Şekil 4.1'de gösterilen bu modele göre pasivasyonun ortadan kalkmasına sebep olan beton içerisindeki klorür ve CO₂ miktarının belirli bir seviyeye ulaşmasına kadar geçen süreyi temsil eden birinci aşamaya **başlangıç aşaması**, aktif korozyonun malzemeye hasar vermeye başladığı bölgeye de **ilerleme aşaması** adı verilir. İlerleme aşamasında korozyon hızını gösteren doğrunun eğimi sıcaklık, bağıl nem ve oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak değişir.



Şekil 4.1: Betonarme yapı ömrü için tasarlanan iki aşamalı korozyon modeli (Elsener, 2001) (Bentur ve diğ., 1997)

4.1 Korozyon Mekanizması

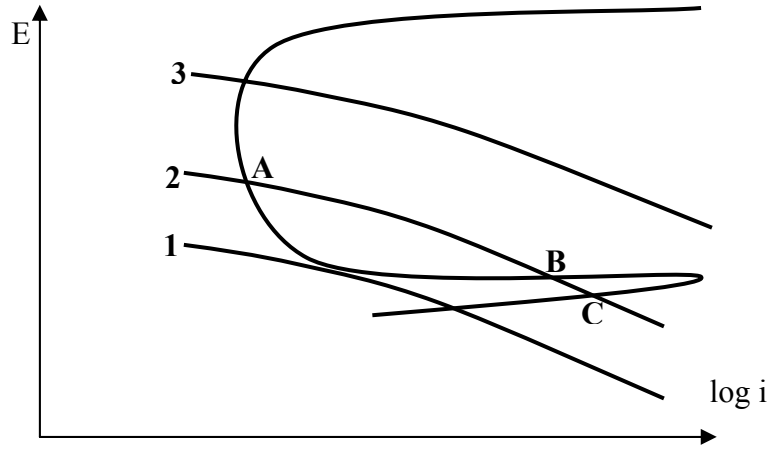
Çeliğin korozyonu elektrokimyasal bir olaydır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere oksidasyon (anodik) ve redüksiyon (katodik) reaksiyonlarından oluşan korozyonun temelini anodun (çelik) elektron kaybederek çözünmesi oluşturur. Kaybedilen elektronun başka bir yerde harcanması da redüksiyon (indirgenme) reaksiyonunu oluşturur. Diğer kimyasal olaylarda olduğu gibi anodik ve katodik reaksiyonlar denge halindedir. Anottan ayrılan elektron katoda doğru ilerlerken çözeltildeki (beton) negatif iyonlar anoda yönelirler. Korozyon potansiyeli (E_{kor}) ise anodik ve katodik reaksiyon hızlarının dengede olduğu potansiyel değeridir. Bu denge reaksiyonlarından birinin engellenmesi korozyon oluşumunu önler.



Şekil 4.2: Betona gömülü çelik donatının tam korozyon hücresi

Belirli çevre şartları altında bazı metal ve alaşımların kimyasal aktivitelerinin kaybolmasına *pasivite* denir. Yani, bazı metal ve alaşımlar belirli şartlar altında inert (soy) davranırlar. Bir başka deyişle bir korozyon sistemi içinde korozyon potansiyeli arttıkça korozyon hızının da artması gerekirken potansiyel kritik bir değerin üzerine çıktığında korozyon hızı azalıyor metal pasifleşiyor denir. Basitçe “metal bazı çevre koşullarında kimyasal tepkime verme yeteneğini yitirmesi” olarak tanımlanır.

Aktif – pasif geçişli bir malzemede katodik reaksiyona bağlı olarak (örneğin ortamda inhibitör bulunması) katodik polarizasyon eğrisi için üç durum söz konusudur. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi birinci durumda kesişme noktası (denge hali) aktif bölgede olduğundan metal pasifleşmeden korozyona uğrar. İkinci durumda iki eğrinin kesişimi A noktasında gerçekleşiyorsa pasifleşme oluşur, B ve C noktalarında pasifleşme oluşmaz fakat ortamdaki bazı değişikliklerin A'daki kesişimi her an B veya C'ye taşıma olasılığı yüzünden istenmeyen bir durumdur. Oda sıcaklığında, %70 derişiminde HNO_3 çözeltisi içerisindeki çeliğin davranışı ile çözelti seyreltilip çalkalandıktan sonraki davranışları bu duruma en uygun olan örnekler (Şengil, 1992). Üçüncü durumda ise kesişim daima pasif bölgede kaldığından sistem aktif yapılamaz; bu durumu veren malzeme ideal bir malzemedir.



Şekil 4.3: Pasifleşen bir metalin polarizasyon eğrileri

Faraday'ın ilk olarak 1840 yılında pasifliğin doğasını anlamak amacıyla yukarıda bahsedilen deneyi yapmasının ardından 160 senedir pasifliğin aydınlatılabilmesi amacıyla bir çok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir; ancak pasiflik olayı tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Son yıllarda yapılan elektrokimyasal incelemeler korozyon ve pasiflik alanındaki bilgileri önemli derecede arttırmıştır.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, betona gömülü çelik donatı korozyonunun iki temel nedeni vardır; klorür etkisi ve karbonatlaşma. Her ikisi de betonun bütünlüğüne ciddi bir zarar vermediği halde çelik donatının pasifliğini doğrudan veya dolaylı olarak bozdukları için betonarme yapıda hasara yol açarlar.

4.1.1 Karbonatlaşma

Karbonatlaşma, atmosferdeki CO₂ moleküllerinin konsantrasyon farkından dolayı beton içerisine girerek, ortamda bir miktar su bulunması durumunda, içerdeki alkali hidroksitlerle tepkimeye girmesidir (Neville, 2000). Difüzyon hızını belirleyen en önemli etkenlerden biri beton içerisindeki nem miktarıdır. Suyla birleşerek karbonik asit oluşturan CO₂, ancak bundan sonra Ca(OH)₂ ile tepkimeye girerek kalsiyum karbonatları (CaCO₃) meydana getirir. Diğer taraftan, betonun %100 oranında suya doymun olması durumunda karbon dioksitin suda zayıf olan çözülme yeteneği nedeniyle nispeten çok daha az miktarda CO₂ girişi olacağından belirgin bir karbonatlaşma gerçekleşmez (Bentur ve diğ., 1997). Karbonatlaşma sonucunda betonun pH değeri 13,5 seviyesinden 8'e kadar düşebilir (Broomfield, 1997).

Bir betonda meydana gelen karbonatlaşmanın derecesi sadece derinlik olarak saptanır. Tepkimenin betona belirgin bir zarar vermesinin söz konusu olmaması nedeniyle esas amaç karbonatlaşma sınırının çelik donatıya olan mesafesinin saptanmasıdır. Betonun geçirimsizliği, karbonatlaşma hızını belirleyen en önemli etkidir ancak çimento tipi ve/veya bağlayıcı kompozisyonu da, beton içerisinde CO₂ ile birleşecek olan Ca(OH)₂ miktarını belirlediğinden dolayı oldukça etkilidir. Diğer taraftan mühendislik açısından bakıldığında iyi beton kalitesi, yeterli kür uygulaması ve uygun beton bileşiminin seçilmesinin yanında paspayı kalınlığına dikkat edilmemesi durumunda korozyonun önlenemeyeceği unutulmamalıdır. Karbonatlaşma hızı genel olarak derinliğin zamana bağlı fonksiyonu şeklinde tanımlanır:

$$x = k \cdot t^{1/n} \quad (4.1)$$

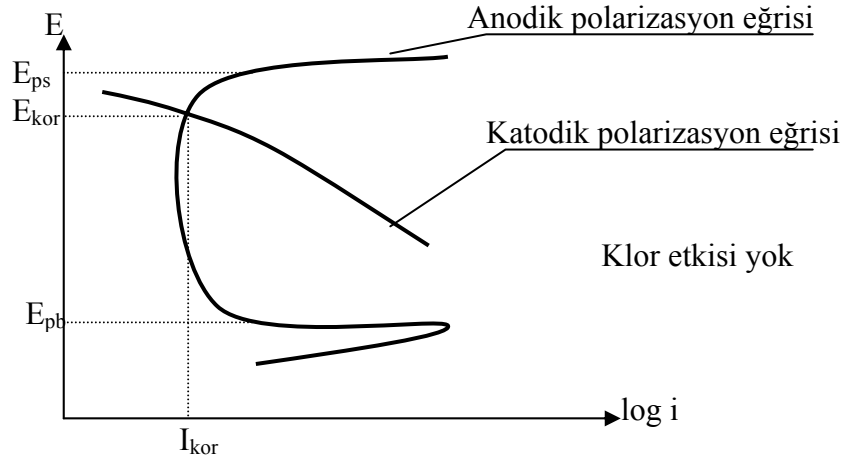
Bu ifadede x karbonatlaşma derinliğini, t geçen süreyi, k ise CO₂ konsantrasyonu, bağlayıcı özellikleri ve ortam şartlarına (nem, sıcaklık vb.) bağlı olarak değişen karbonatlaşma katsayısını temsil etmektedir. Üstel kısımdaki n sayısı çoğunlukla 2 olarak alınsa da 1,5 ile 2,5 arasında değiştiği söylenebilir (**Bentur ve diğ., 1997**).

4.1.2 Klorür ve Oksijen Konsantrasyonunun Etkisi

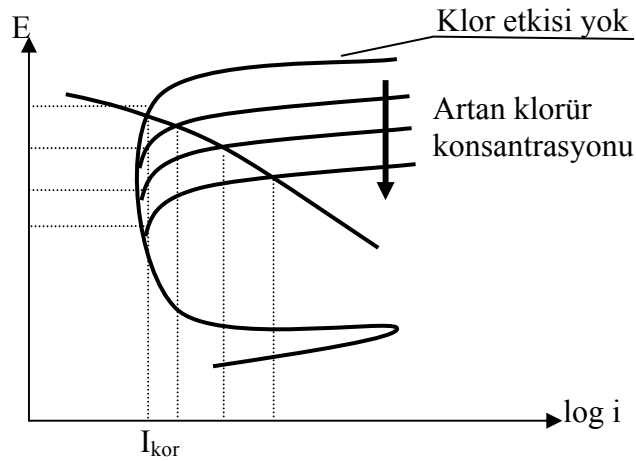
Beton gibi alkali bir ortamda klorür gibi agresif iyonların bulunmadığı halde çeliğin anodik polarizasyon eğrisi ile kaybedilen elektronların harcandığı katodik polarizasyon eğrileri Şekil 4.4’de aynı eksen takımında gösterilmiştir. Polarizasyon eğrilerinin kesişim noktasından korozyon potansiyeli bulunabildiği gibi korozyon akımı (I_{kor}) da bulunabilir. Karbonatlaşmanın oluşmadığı ve klorür etkisinin bulunmadığı beton içerisindeki çelik genelde pasif haldedir. Bundan dolayı eğrilerin kesişim noktası pasif bölgede bulunur.

Korozyon potansiyelinin büyüklüğü anot ve katodun aktivitesine bağlıdır. Beton içerisindeki çeliğin anodik davranışı ise klorür etkisinin mevcudiyeti ile değişir. Klorür etkisi durumunda çukurcuk oluşumu nispeten daha erken başlamakla birlikte, çukurcuk oluşan bölgede korozyon akım yoğunluğu yüksek olduğundan – klorür etkisi olsun ya da olmasın – anodik polarizasyon eğrisi yatay hale geçer. Pasif bölgeden sonraki yataylık (E_{ps} : pasif bölge sonundaki potansiyel) çukurcuk

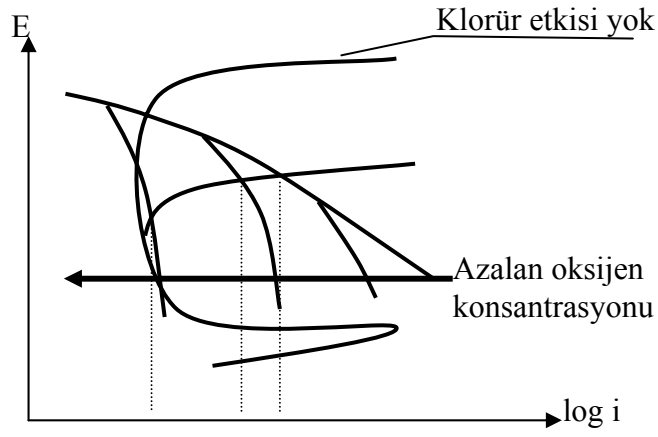
korozyonu oluştuğunu gösterir. Artan klorür konsantrasyonu ile birlikte çelik donatının pasif kaldığı bölge daralır ve çukurcuk korozyonu oluşumu daha erken başlar. Böyle bir durumda her klorür konsantrasyonu için çeliğin anodik polarizasyon eğrisi çizilip Şekil 4.5’deki gibi katodik polarizasyon eğrisi ile aynı eksen takımında çakıştırıldığında, çukurcuk korozyonu oluşumunun daha düşük potansiyellerde başlamasının yanında ‘korozyon hızı’ olarak da ifade edilen denge halindeki akımın (I_{kor}) arttığı görülebilir.



Şekil 4.4: Alkalın ortamdaki çeliğin anodik polarizasyon eğrisi ile oksijen indirgenmesini temsil eden katodik polarizasyon eğrilerinin aynı eksen takımında görünümü (E:Potansiyel, I:Akım)



Şekil 4.5: Artan klorür konsantrasyonu ile birlikte beton içerisindeki çeliğin anodik davranışının değişimi



Şekil 4.6: Klorür etkisi altında azalan oksijen konsantrasyonunun korozyon hızı üzerindeki etkisi

Oksijen konsantrasyonunun çukurcuk korozyonu oluşumu sırasında korozyon hızına etkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Çözülmüş oksijen miktarı azaldıkça katodik polarizasyon eğrisi düşey hale gelse de çukurcuk oluşumundan kolay kolay kurtulamamakta fakat korozyon hızı dikkate değer şekilde düşmektedir. Özellikle su altında kalacak yapılarda karşılaşılabilecek kadar düşük oksijen konsantrasyonlarında ise iki eğrinin kesişim noktası ancak pasif bölgede bulunabilir. Bu sebepten dolayı, sadece korozyon potansiyeli ölçümlerine dayanarak belirlenen korozyon hızı değerlendirmelerinde çevre şartlarının etkisi özellikle gözönünde bulundurulmalıdır.

Eğer karbonatlaşma meydana gelmiş ise anodik polarizasyon eğrisinde pasiflik bölgesi oluşmaz. Bu durumda oksijen konsantrasyonunun korozyon hızı (I_{kor}) üzerindeki etkisi oldukça yüksektir.

4.2 Korozyon Ölçüm Yöntemleri

Beton içerisine gömülü çelik donatı korozyonunun ölçümü, agresif ortamda bulunan betonarme yapının mevcut durumunu ve ilerideki performansını belirlemede oldukça önemli bir araçtır. Ölçüm yöntemlerinin birçoğu şartnamelerin geliştirilmesi ve korozyon oluşumunun engellenmesinde kullanılan sistemlerin oluşturulması için laboratuarda kullanılsa da mevcut yapının durumunu belirlemek amacıyla bazı yöntemler de geliştirilmiştir.

Korozyon ölçümlerinde temel amaç korozyon hızını veya mekanizmasını belirlemektir. Bu ölçümler çıplak gözle muayene gibi basit yöntemlerle yapılabildiği

gibi karmaşık elektrokimyasal metotlar ve aletler de kullanılabilir. Her iki durumda da önemli olan yöntemin esasını anlamak, eksiklikleri ve yeterliliklerini bilmektir.

4.2.1 Ağırlık Kaybı Ölçümleri

Belirli bir zaman süresince agresif bir ortamda tutulan numunelerin ağırlığındaki değişimin ölçülmesine dayanan ve oldukça yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir. Korozyondan dolayı meydana gelen ağırlık kaybının doğru belirlenebilmesi için korozyon ürünlerinin çok dikkatli bir şekilde temizlenmesi gerekir. Temizleme tamamlandıktan sonra numune ağırlığı ilk ağırlıkla kıyaslanır. Ağırlık farkının deney süresine oranı korozyon hızını verir. Bu yöntem pahalı aletler kullanmaya gerek kalmadan ortalama bir korozyon hızı elde etmemizi sağlasa da numuneye hasar verir ve dolayısıyla yapı üzerinde kullanılamaz. Laboratuarda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar güvenilir olsa da bu sonuçların sağlanması oldukça uzun sürer. Beton içerisindeki çeliğe uygulanması halinde ağırlık kaybının ölçülebilmesi için çeliğin betondan tamamen temizlenmesi gerekir. Ayrıca bu yöntemde anlık hızın ölçülemeyip ortalama ve son duruma göre bir korozyon hızı hesaplanabilmesi ve düşük korozyon hızlarında uygulama gücünü diğer zorluklardır. Ağırlık kaybı ölçümleri genellikle diğer yöntemlerle elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde ve doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılır **(Escalante ve Ito, 1990) (Lemoine ve diğ., 1990) (Asthana ve diğ., 1999) (Elsener ve diğ., 1999)**.

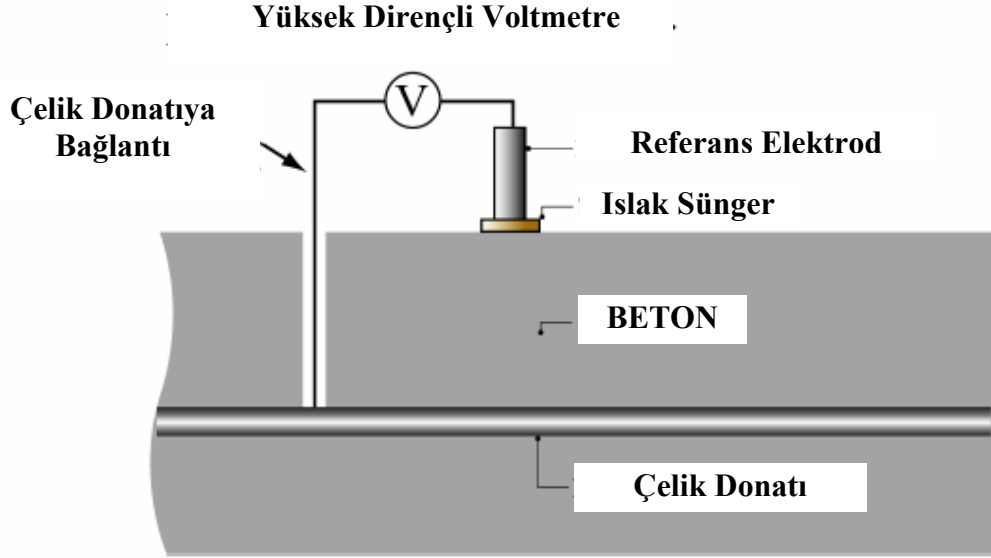
Çukurcuk oluşumu söz konusu olduğu zaman ağırlık kaybının önemi kaybolduysa da ASTM G46 standardı esasları uyarınca birim alandaki çukurcuk sayısı ve derinliği gibi diğer gözleme dayalı ölçümler gerçekleştirilir.

4.2.2 Elektrokimyasal Yöntemler

Günümüzde donatı korozyonu üzerine yapılan çalışmalarda en çok başvurulan yöntem elektrokimyasal yaklaşımı içerir. Beton içerisindeki çeliğin korozyon açısından davranışını incelemek için oldukça yaygın bir şekilde kullanılan bu yöntemlerin birçoğu hasarsız gerçekleştirilebildiği gibi belirli bir süre içinde donatının davranışının izlenmesini de sağlar.

4.2.2.1 Korozyon Potansiyeli Ölçümü (Yarı Hücre Potansiyeli)

Hem yapı üzerinde hem laboratuarda olmak üzere en çok kullanılan, hasar oluşturmayan ve oldukça basit olan bu yöntemde, belirlenmiş koşullar altında anot ve katot reaksiyonlarının dengede olduğu potansiyel korozyon potansiyeli olarak belirlenir. Bu potansiyel, çelik donatı ile bir referans elektrod arasındaki voltaj farkının yüksek dirençli bir voltmetre yardımı ile ölçülmesiyle bulunur (Şekil 4.7). ASTM C 876 (1991) standardında detayları anlatılan deneyde voltmetrenin iç direnci 10 M Ω 'dan az olmamalıdır. Ölçülen korozyon potansiyeli değerleri, homojen korozyon oluşumu söz konusu olmadığı sürece korozyon hızı hakkında bilgi vermez.



Şekil 4.7: Yarı hücre potansiyeli ölçüm şeması

ASTM C 876 standardında çeliğin, referans elektrodu olarak bakır/bakır sülfat'a göre yarı hücre potansiyel değerleri verilmiş olsa da, kısa ömrü ve sık kalibre edilmesi zorunluluğundan dolayı gümüş/gümüş klorür veya kalomel referans elektrodlarının kullanılması önerilmektedir (Broomfield, 1997) Tablo 4.1'de en yaygın olarak kullanılan birkaç referans elektrodlarıyla yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde temel alınan ölçütler verilmiştir.

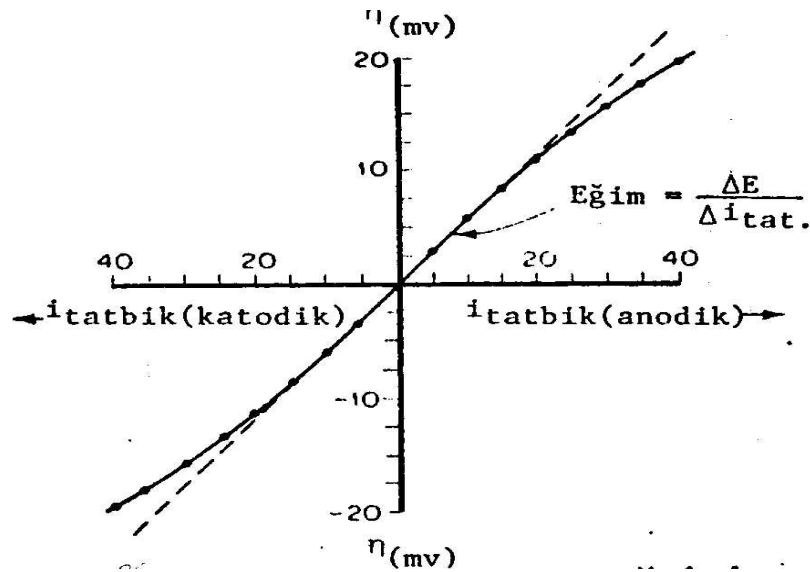
Tablo 4.1: Çelik donatının farklı referans elektrodla göre yarı hücre potansiyellerinin değerlendirme ölçütleri

Bakır/Bakır Sülfat (mV)	Gümüş/Gümüş Klorür (mV)	St. Hidrojen Elektrodu (mV)	Kalomel Elektrod (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

4.2.2.2 Polarizasyon Direnci Yöntemi (Lineer Polarizasyon)

1957 yılında Stern tarafından yayınlanan ilk çalışmadan beri, doğrusal akım kullanılarak uygulanan polarizasyon direnci tekniği, korozyon hızı ölçümlerinde en çok kullanılan yöntem olmuştur. Çünkü, korozyon potansiyeli civarında akım ile potansiyelin logaritmik ilişkisinin doğrusal davranışı sayesinde basit, hızlı ve hasarsız bir yöntem oluşturulmuştur. Beton içerisindeki ilk uygulamaları 70'lerin başında denenmiştir. Bir potansiyostat ve bazı yardımcı aletler gerektiren bu ölçüm yöntemi ASTM G59 (1991) standardında anlatılmıştır.

Polarizasyon direnci yönteminde, korozyon potansiyeli civarında polarizasyon oluşturacak (genellikle $\pm 10\text{mV}$ 'luk sınır içinde kalır) dış akımlar uygulanır ve çizilen polarizasyon eğrilerinin doğrusallığı incelenir, yani şekil 4.8'de gösterilen eğrinin doğrusal kısımlarının eğimi bulunmaya çalışılır.



Şekil 4.8: Lineer polarizasyon eğrisi (η :Potansiyel fark, i :Uygulanan akım)

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi E_{kor} civarındaki birkaç mV’luk polarizasyon bölgesinde meydana gelen potansiyel fark ile tatbik edilen akım değerleri birbiriyle doğrusal olarak orantılıdır. Polarizasyon direnci değerine eşit olan bu doğrusal bölgenin eğimi korozyon hızı ile ters orantılıdır.

$$\Delta E/\Delta i \Big|_{i=0} = R_p \quad \text{veya} \quad I_{kor} = B/R_p \quad (4.2)$$

Burada i uygulanan akımı, I_{kor} korozyon hızını ($\mu A/cm^2$), R_p polarizasyon direncini ($ohm \cdot cm^2$) ve B de bir sabiti (yaklaşık 26mV) gösterir.

Beton, yüksek elektriksel dirence sahip bir malzeme olduğundan hatalı sonuçlar elde etmeye neden olabilir. Doğru olan polarizasyon direnci, ölçülen polarizasyon direnci ile betonun elektriksel direnci arasındaki farktır ($R_p = R_{p,ölçülen} - R_{beton}$). Beton direnci ayrıca kendi başına ölçülebildiği gibi yeni model potansiyostatlarda bulunan **akım kesme tekniği** sayesinde belirlenebildiği için oluşturduğu sorun ortadan kaldırılabilir. Beton direncinin önemsenmemesi halinde olduğundan daha düşük korozyon hızları elde edilir.

4.2.2.3 Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopi Yöntemi

Alternatif akım sinyalleri kullanılan elektrokimyasal yöntemler uzun süredir bilinse de korozyon biliminde kullanımı son yıllarda başlamıştır. Lemoine ve arkadaşları (1990) bu yöntemi betona gömülü çelik donatıya ilk uygulayanlardan biridir.

Yöntem, çalışan elektrod olarak görev yapan donatıya doğrusal sinyal yerine alternatif sinyal uygulama temeline dayanır. Kullanılan aletler daha karmaşıktır çünkü E_{kor} ölçen ve kaydeden potansiyostata alternatif akım uygulaması ve değerlendirmesi için spektrum frekans analizörü ilave etmek gerekir.

Bu yöntemde çalışan elektroda (donatı) korozyon potansiyeli civarında, geniş bir frekans aralığında, düşük şiddette (10-20mV) sinüsoidal bir voltaj uygulanır. Her frekansın karşılığı bir başka sinüsoidal sinyal olarak farklı şiddette (potansiyostat sebebiyle ΔI olarak ölçülür) ve girdi sinyaline bağlı değişen bir fazdadır.

$\Delta E/\Delta I$ oranı bu durumda sinüsoidal özellik gösteren impedansa (Z) eşit olur. Bu da (Z) birincisi bir direnç ifade eden, ikincisi 90° değişen bir fazdaki kapasitatif özellik gösteren terimlerden oluşur:

$$Z = R_e + [R_T / (1 + j.w.c.R_T)] \quad (4.3)$$

Burada,

w : açısal frekans ($2\pi f$)

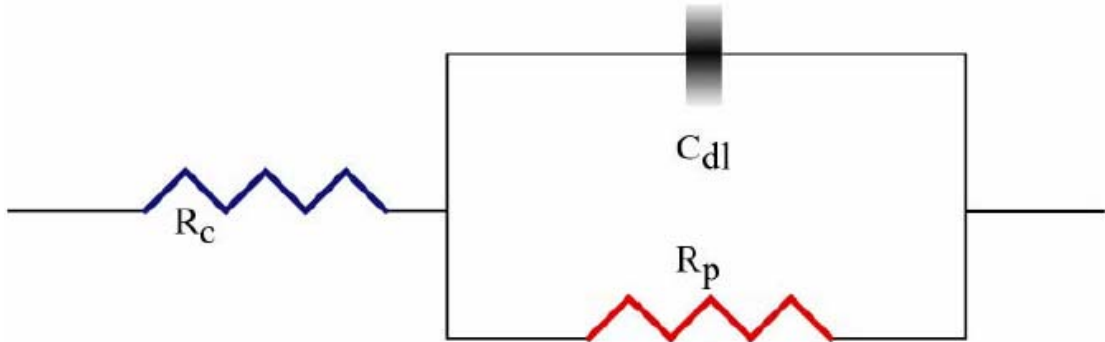
R_e : Elektrolit direnci-Beton (Ω)

j : imajiner kısım ($\sqrt{-1}$)

c : Elektrod kapasitansı

R_T : Polarizasyon direncine eşit olduğu kabul edilen transfer direnci

İmpedans veya alternatif voltajın alternatif akıma oranı, frekansın bir fonksiyonu olarak çizilir. Bu tekniğin anlaşılması için beton içindeki çeliğin bir devre gibi davrandığı düşünülerek modelleme yapılır (Şekil 4.9). Beton direnci R_e , polarizasyon direnci R_p ve metal-beton arayüzeyini temsil eden bir kapasitör de içeren devreye yüksek frekans uygulandığında impedans beton direncine eşit olmakla birlikte frekans sıfıra yakın bir değere düşürüldüğünde ise impedans beton direnci ile polarizasyon direncinin (R_p) toplamına eşit olur.

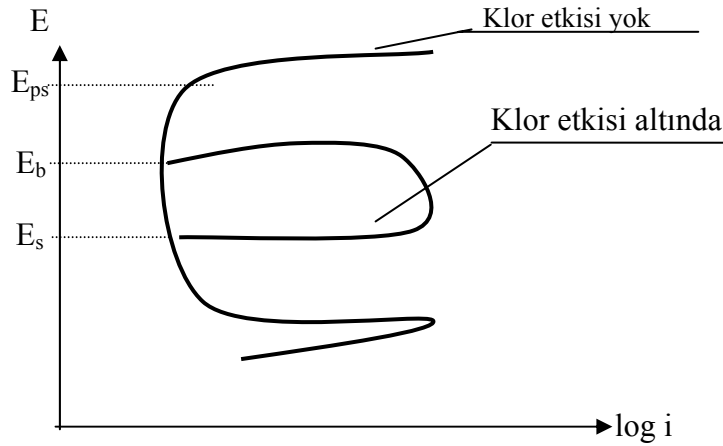


Şekil 4.9: Betona gömülü çeliğin polarizasyonunda elektrik devre modeli

Sonuç olarak, korozyon hızı belirlenmesinde EIS yöntemi doğrusal akım yöntemlerinin sağladığı tüm avantajlara sahip olsa da ekipmanın pahalı ve karmaşık, deney süresinin oldukça uzun olmasına rağmen, R_p değeri bulunduğundan sonra aynı işlemlerin yapılacak olmasından dolayı çok fazla yaygınlaşmamıştır (Jones, 1996).

4.2.2.4 Çevrimsel Polarizasyon Yöntemi

Herhangi bir çevre içindeki metalin çukurcuk oluşturma eğilimini veya kullanılan inhibitörün anodik ya da katodik olduğunu anlayabilmek için uygulanan oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Çelik etrafındaki betonu temsil etmek amacıyla kalsiyum hidroksite doymuş klorür çözeltisi kullanılan yöntemde çelik potansiyeli, bir potansiyostat vasıtasıyla korozyon potansiyelinden çok daha düşük bir seviyeye ayarlanır ve koruyucu pasivasyon tabakası oluşumuna izin verecek kadar yavaş bir hızla arttırılır. Şekil 4.10'da görülen anodik polarizasyon eğrisindeki gibi akımda ani bir artış görüldüğünde (E_{ps} veya E_b) pasivasyonun sona erdiği veya çukurcuk oluştuğu anlaşılır. Akım yüksek bir değere ulaştığında ters yönde fakat hızlı bir şekilde tarama devam ettirilir çünkü numunenin yüksek akıma uzun süre maruz kalmaması istenir. Pozitif yöndeki taramayı gösteren eğri ile negatif yöne ait eğrinin kesiştiği 'sınır' potansiyelinden (E_s) daha düşük potansiyel değerlerinde çukurcuk korozyonu oluşmayacağı söylenebilir. Çukurcuk oluşumu gerçekleşmiyorsa dönüş eğrisi gidişe çok yakın geçer. Çelik etrafında beton yerine sıvı çözelti kullanılması beton direncinden kaynaklanan hataların oluşmasını engeller. ASTM G 61 (2003) standardında anlatılan bu yöntem hasar verdiği için yapı ölçümlerinde kullanılmaz.



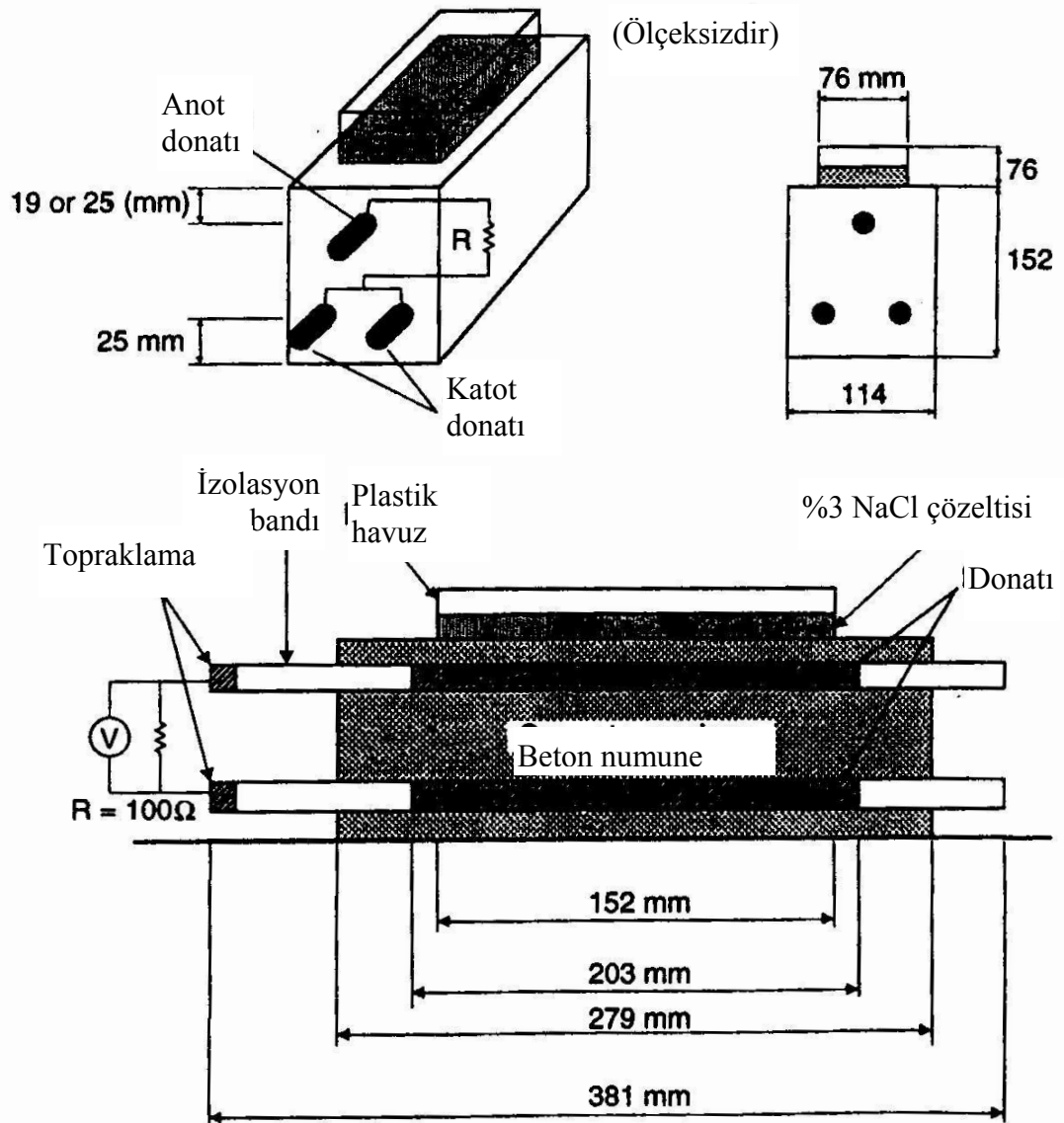
Şekil 4.10: Alkalın çözelti içindeki çeliğin çevrimsel polarizasyon eğrisi

4.2.2.5 Makrohücre Yöntemi

Beton içerisinde farklı derinliklerde bulunan çelik donatıların dış etkilerden de farklı şekilde etkilenmesini incelemek amacıyla uygulanan bu yöntemde daha agresif

ortamda bulunan donatı ile buna göre katot olan diğer donatılar arasından geçen akım ölçülür. Farklı klor içerikleri veya karbonatlaşma dereceleri doğrultusunda pasivasyon tabakası önce kaybolan donatının anot haline gelmesini inceleyen yöntem ASTM G 109 (1992) numaralı standartta tarif edilmiştir.

Paslanmaz çelik veya grafit gibi soy katotlar kullanılarak da bir başka konfigürasyon uygulanabilir. Bu uygulama farklı derinliklere gömme işlemine gerek bırakmadığından daha küçük numunelerle çalışılabilir. Çünkü katot, anot ile aynı ortamda da bulursa paslanmayacaktır. Bu sayede donatılar daha yakın yerleştirilerek betonun yüksek direncinden kaynaklanabilecek hatalar da asgari düzeye indirilir.



Şekil 4.11: Makrohücre yöntemi

Makrohücre akımının, paslanmakta olan ve katot elemanlar arasındaki akımı tanımlaması korozyon başlangıcını belirlemede önemli olsa da galvanik akım olması açısından bölgesel mikrohücre bölgeleri hakkında bilgi vermez. Ayrıca ortam direncinin çok yüksek olduğu durumlarda makrohücreler oluşmayabilir. Toplam korozyon aktivitesinin sadece bir kısmını oluşturduğu tespit edilmiş olsa da ölçüm sisteminin basitliği ve hasar vermeyen bir yöntem olması bakımından oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Şekil 4.11’de gösterilen şekilde kurulan sistemde anot ve katot halindeki donatılar arasındaki potansiyel fark sıfır iç dirence sahip bir voltmetre ile ölçülerek mevcut makrohücre akımı doğrudan hesaplanabilir ($I=V/R$). Yöntem hasar vermediğinden aynı numune için makrohücre ölçümleri zamana bağlı olarak gerçekleştirilip toplam geçen akım miktarı hesaplanır (Coulomb) **(Sagües ve diğ., 2003) (Lorentz ve French, 1995)**.

4.2.2.6 Potansiyostatik/Galvanostatik Yöntemler

Potansiyostatik yöntemde metal sabit bir potansiyelde polarize edilip bu potansiyelin korunması için gerekli akım kaydedilirken galvanostatik yöntemde sabit akım uygulanıp karşılığında potansiyel okunur. Korozyon oluşumu ilkinde ani artan akım kayıtları sayesinde, ikincisinde ise ani potansiyel azalmaları ile belirlenir.

Her iki yöntem de, korozyon potansiyelinin en az 100 mV üzerine çıkıldığından numuneye hasar verir ve genellikle kimyasal katkılarla inhibitörlerin donatı korozyonuna etkisini incelemek amacıyla uygulanırlar.

Potansiyostatik uygulamalarda negatif yüklü klor iyonları anot olan donatıya doğru hareket ettiğinden klorun betona girişini hızlandırdığı gibi yüksek beton direnci gerçek potansiyel değerlerinden önemli miktarda farklı potansiyel okumalarına neden olabilir. ASTM C 1202-97 veya AASHTO T 277-89 numaralı standartlarda anlatılan hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneylerinden elde edilen toplam geçen akım miktarı değerleri, betonun buradaki klor geçirimsizliği ile ilişkilidir.

İnhibitör etkinliği veya katkıların korozifliği belirlenmek istendiğinde kullanılacak çimentonun C₃A miktarı (klor bağlama özelliğinden dolayı) %5’ten az olmalıdır. Bir başka yöntemde içerisine donatı yerleştirilen küçük silindir harç numuneler 3 gün

kalıpta, 1 gün kireçli suda kür edildikten sonra ya +100 mV (SCE) (inhibitör değerlendirilmesi için), ya da +200 mV (SCE)'ta 24 saat polarize edilir. Korozif olmayan bir katkıda ortalama akım yoğunluğu $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den küçük olması gerekirken anodik korozyon inhibitörü kullanıldığında verim %90'dan büyük olmalıdır (Verim = $[1 - I_{\text{inhibitör}} / I_{\text{kontrol}}]$).

4.2.2.7 İletkenlik Ölçümleri

Betonun iletkenliği, geçirimsizliği ile ilişkili olup aynı zamanda makrohücre korozyonu oluşma durumu hakkında bilgi verir. İletkenliğin tersi direnç'tir (1/iletkenlik) ki aslında birçok deney yöntemi sonucu belirlenen özellik aslında budur.

Beton göreceli olarak yüksek dirence ($>3\text{k}\Omega\text{cm}$) sahiptir. Direnç bazen birkaç yüz $\text{k}\Omega\text{cm}$ 'yi bulabilir. Bundan dolayı direnç ölçümleri için büyük doğrusal akım voltajı veya küçük alternatif akım voltajı gereklidir. Daha önce de belirtildiği gibi EIS yönteminin yüksek frekansta ($\approx 20000\text{Hz}$) uygulanması ile direnç ölçümü yapılabilir. Lolipop numuneler direnci $1\Omega\text{cm}$ olan tuzlu suya daldırılır. Şekil 4.12'de gösterilen numunede üç elektrodla yapılan ölçüm sonuçlarından direnç değerleri aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$R = \rho \ln(a/b) / 2\pi l \quad (4.4)$$

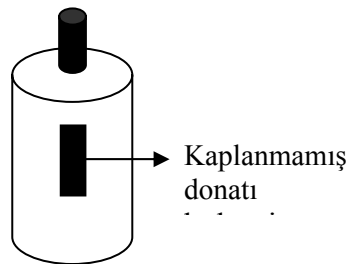
Burada,

R : Direnç ($R_{\text{beton}} / \text{donatı yüzey alanı}$)

ρ : öz direnç

a : donatı yarıçapı

b : beton yarıçapını gösterir



Şekil 4.12: İletkenlik deneyleri için lolipop numune

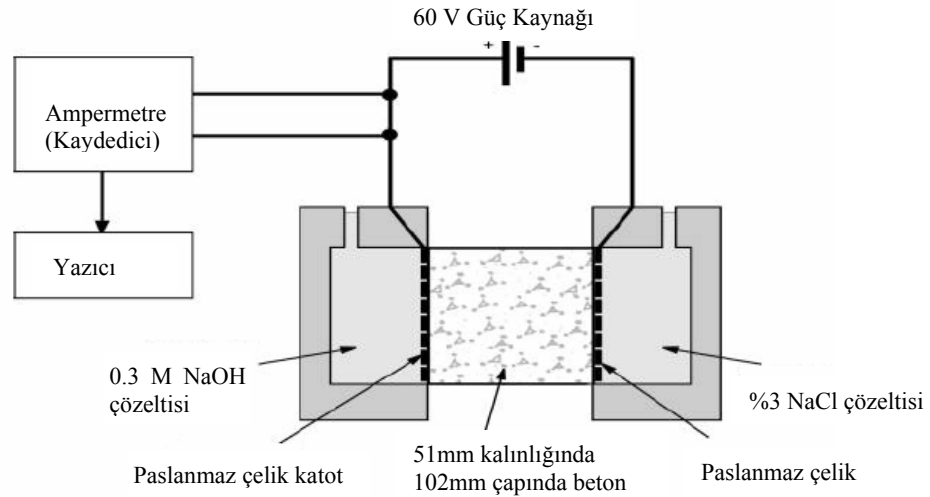
Beton direncini ve iletkenliğini belirlemeye yarayan bir başka yöntem de ASTM C 1202 standardında bahsedilen klor geçirimsizliğine karşı direnç deneyidir. Bu deneyde, 51 mm kalınlığında 102 mm çapında numune, bir tarafında NaCl diğer

tarafında NaOH çözeltileri bulunan hücreler arasına yerleştirilerek (Şekil 4.13) 60V doğrusal akım potansiyeli altında altı saat boyunca en az yarım saatte bir akım okumaları yapılır. Zamana bağlı olarak çizilen akım eğrisinin altındaki alan hesaplanarak toplam geçen akım miktarı elde edilir. Ayrıca her akım okunduğu anda betonun öz direnci hesaplanabilir (4.5).

$$R = V / I \quad \rightarrow \quad \rho = R A / l \quad (4.5)$$

Burada, A : diskin kesit alanı l : disk kalınlığını gösterir.

EIS yöntemi ile ASTM C 1202 (RCPT)'de anlatılan yöntem kullanılarak elde edilen öz direnç değerleri son derece uyumlu çıkmıştır. RCPT yöntemi klorür geçirimsizliğini ölçmek amacıyla geliştirilmiş olsa da elektriksel direnç değerinin doğrudan elde edilebilmesini sağlamaktadır. Çünkü elektriksel direnç ile klorür geçirimsizliği arasındaki ilişki her zaman doğrusal olmaz ve aynı istikrarı göstermez.



Şekil 4.13: ASTM C 1202 deney düzeneği

Sonuç olarak korozyondan zarar gören betonarme elemanlar üzerinde oldukça fazla çalışma gerçekleştirilmiş ve yöntem geliştirilmiştir. Tablo 4.2'de özetlenmiş olan bu yöntemler beraber veya tek başına kullanılarak korozyon oluşumu hakkında daha detaylı bilgiye ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Tablo 4.2: Betona gömülü donatı korozyonunu değerlendirme teknikleri

Yöntem	Korozyon aşaması	Tespit
Özdirenç	Başlangıç ve ilerleme	Beton direnci
Lineer polarizasyon	ilerleme	Korozyon hızı
Yarı hücre potansiyeli	aşamaları	Korozyon riski
Geçirimsizlik		Difüzyon hızı
Fenolfitalein	Başlangıç aşaması	Karbonatlaşma derinliği
Klor içeriği		Klor etkisiyle korozyon
Ultras ses hızı	İlerleme	Beton özellikleri
Çekiç	aşaması (hizmet süresi) sonu	Delaminasyon
Gözlem		Yüzeysel hasarlar

5. DENEYSEL TASARIM VE ÇÖZÜMLEME YÖNTEMLERİ

Deneysel tasarım mühendislik verilerinin toplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Tasarlanmış bir deneyde mühendis, incelediği sistem dahilindeki bağımsız değişkenler üzerinde amacına yönelik değişiklikler yaparak sonuçları ve bu sonuçlara dayanarak sistemin toplamının performansını gözlemleyebilir, değerlendirebilir ve müdahale edebilir (**Montgomery ve diğ., 2007**). Sadece gözleme ya da geriye dönük veri toplamaya dayanan yöntemlere kıyasla en önemli farkı incelenen değişkenlerin (faktörlerin) istenilen sayıda ve aralıkta rastgele denenebilmesidir. Böylece diğer yöntemlerde yapılamayan neden-sonuç ilişkisinin belirlenebilmesi mümkün olabilmektedir.

Herhangi bir sorunun düzenlenmesinde ve çözümlenmesinde mühendisler tarafından en çok kullanılan araçlardan biri modellerdir. Ohm yasası, Darcy kuralı ve bunlar gibi fiziksel, kimyasal veya mühendislik bilimlerindeki olaylar hakkındaki bilgilere dayanan modellere mekanik modeller denir. Ancak bazen mekanik modelleri etkileyen daha fazla etkenin (sıcaklık, bağıl nem, malzeme özellikleri gibi) varlığı söz konusu olabilir. Böyle durumlarda bu faktörlerin etkisini bazı gözlemlere dayanan ampirik modeller geliştirerek mekanizmaya dahil etmek gerekir. Ampirik modellerden de mekanik modeller gibi çözümlemede yararlanılmaktadır.

Tepki Yüzeyi Yöntemi (TYY) deneysel tasarımda, yeni ürün/üretim süreci oluşturmada ve mevcut ürünlerin/üretim süreçlerinin geliştirilmesinde oldukça verimli olarak kullanılabilen, istatistik ve matematik kurallar bütünüdür (**Myers ve Montgomery, 2002**). Esas olarak ürünün kalitesi ile üretim ve/veya ölçüm sürecinin performansını etkileyen bağımsız değişkenlerin (girdilerin) etkinliğinin belirlenmesinde faydalanılan yöntemde, kalite veya performansla ilgili olarak elde edilen sonuca **tepki** adı verilir. Amaç ise bağımsız değişkenler cinsinden belirlenen tepki fonksiyonlarının (her tepki için ayrı bir fonksiyon olmak üzere) (5.1) en uygun (optimum) bileşiminin veya üretim sürecinin belirlenmesidir.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (5.1)$$

Burada x_1, x_2, \dots, x_n araştırmacı tarafından seçilen ve kontrol edilebilen bağımsız değişkenleri, f bağımsız değişkenlerle tepki arasındaki başlangıçta bilinmeyen ilişkiyi, ε ise ölçüm hataları ve elde edilen tepki değerleri üzerinde etkili olan diğer dış unsurları göstermektedir. Bağımsız değişkenlerle elde edilen sonuçlar (tepkiler) arasındaki ilişkinin bilinmemesi nedeniyle TYY ile bu ilişki en uygun yaklaşıklıkla saptanmalıdır. Genellikle ilk olarak ilişkinin doğrusal olup olmadığı belirlenir. Eğer doğrusal bir fonksiyon bulunabilirse, elde edilen model;

$$y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n + \varepsilon \quad (5.2)$$

şeklinde birinci dereceden bir ilişki olacaktır. Bazen tepki üzerindeki etkileri bakımından bağımsız değişkenler arasında etkileşim (interaction) söz konusu olabilir. Yani bir bağımsız değişkenin farklı düzeylerinde (seviyelerinde) diğerinin değişiminin etkisi farklılık gösterebilmektedir (Örneğin havada saklanmış bir betonda farklı bağıl nem derecesinde çimento dozajının değişiminin beton geçirimsizliğini farklı şekilde etkilemesi gibi). Böyle durumlarda yukarıdaki fonksiyona (5.2) bağımsız değişkenlerin çarpımları da ilave edilir. Bu, fonksiyona bir miktar eğrilik kazandırsa da model birinci dereceden bir model olma özelliğini korumaktadır.

Sözü edilen eğriliğin ilişkiyi tanımlamada yetersiz kalması halinde daha yüksek dereceden bir polinom kullanılarak ikinci derece bir model tanımlanmalıdır (5.3).

$$y = A_0 + \sum_{j=1}^k A_j x_j + \sum_{j=1}^k A_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum_{i < j=2}^k A_{ij} x_i x_j \quad (5.3)$$

Tepki yüzeyi yönteminde gerçek fonksiyona en yakın ilişkinin bulunabilmesi için her iki tip model de kullanılmaktadır. İkinci derece denklemler gerçek ilişkiyi bulmada daha esnek olması, değişken katsayılarının daha kolay belirlenebilmesi ve uygulamada oldukça fazla denenmiş olması nedeniyle daha fazla tercih edilmektedir. İkinci derece modellerde fonksiyona eğrilik kazandıran terimler de birinci dereceden terimlere dönüştürülerek çoklu doğrusal regresyon modeli haline getirilebilir. Bundan sonra, elde edilen regresyon denkleminin katsayıları (A değerleri), gerçek

tepki değerleri ile fonksiyondan elde edilen değerlerin arasındaki farkın karelerinin toplamı en küçük olacak şekilde belirlenir (**Bayazit, 1996**). En küçük kareler toplamını veren fonksiyonun determinasyon katsayısı (korelasyon katsayısının karesi) bire en yakın durumdadır. Diğer taraftan yüksek determinasyon katsayısı (R^2), her zaman modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermez. Çünkü, elde edilen modeldeki parametre sayısının artması determinasyon katsayısını da arttırır. Bu nedenle parametrelerin model üzerindeki etkisini gösteren düzeltilmiş determinasyon katsayısı ($R^2_{düz}$) tercih edilmektedir(5.4).

$$R^2_{düz} = 1 - \frac{n-1}{n-p}(1-R^2) \quad (5.4)$$

Burada, n gözlem sayısını, p ise modeldeki parametre sayısını göstermektedir. Düzeltilmiş determinasyon (belirlilik) katsayısı bulunduktan sonra modelin ve bağımsız değişkenlerin modeldeki anlamlılıklarının test edilmesi gereklidir. Bunun için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilir.

Kök ortalama kare hatası, düzeltilmiş determinasyon katsayısı, tahmin edilen hata kareleri toplamı (PRESS) testleriyle en anlamlı model seçilir. Ardından modeldeki her bir parametrenin anlamlılığı (gözlem sayısı 20'den az ise t-testi, 20'ye eşit veya fazla ise F-testi ile) bulunur. Anlamlı olmayan parametreler düzeltilmiş determinasyon katsayısını düşüreceğinden, modelden atılır. Ancak tek başına anlamlı görünmese de başka bir parametre (bağımsız değişken) ile etkileşim içerisinde bulunan parametreler atılmaz. Böyle terimlere hiyerarşik (silsileli) terim adı verilir.

Son olarak, uydurulan modelin geçerliliğini belirlemek amacıyla kalıntı analizi gerçekleştirilir. Böylece modelden elde edilen değerlerle gerçek sonuçların arasındaki fark belirlenerek model doğrulanmış olur. Bundan sonra modellerden elde edilen tepki yüzeyleri (3 boyutlu) ya da eştepki eğrileri (2 boyutlu) çizilerek sonuçların değerlendirilmesi ve en uygun bileşim veya sürecin belirlenebilmesi çok daha kolay yapılabilir.

Bu yöntem kendiliğinden yerleşen betonlar (**Sağlam, 2003**) ve lifli betonlar (**Köksal, 2004**) (**Bayramov, 2004**) üzerinde uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, üretilen betonlar, üretim aşamasında uygulanan yöntemler ve yapılan deneyler detaylı olarak anlatılmıştır. Çalışmada beton bileşim özellikleriyle birlikte kür koşullarının geçirimsizlik ve beton boşluk yapısı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca beton geçirimsizliğinin gömülü donatı korozyonuna etki şekli de incelenmiştir.

6.1 Malzemeler

6.1.1 Bağlayıcı Maddeler

Çimento olarak PÇ 42,5 normal portland çimentosu (TS EN 197-1, 2002), uçucu kül olarak Tunçbilek külü ve ELKEM marka silis dumanı kullanılmıştır. Tunçbilek uçucu külü TS EN 197-1 sınıf V (silissi uçucu kül) sınırlarını, %10'dan küçük olan reaktif CaO ve %25'den fazla olan reaktif SiO₂ içeriği ile karşılamaktadır. Bunun yanında, SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamının %70'den fazla olmasından dolayı ASTM C 618 (2003) F tipi uçucu külü sınıfına girmektedir. Silis dumanı, yoğunlaştırılmış (densified) olduğundan görünen inceliği düşüktür. Standart BET yönteminde uygulanandan daha yüksek frekansta bulunan incelik değeri parantez içerisinde verilmiştir. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

6.1.2 Agregalar

İnce agregalar olarak, sırasıyla 2,60 kg/m³ ve 2,70 kg/m³ özgül ağırlıklara sahip doğal ve kırma kum, iri agregalar olarak 25 mm. maksimum boyutlu ve 2,72 kg/m³ özgül ağırlığında kırmataş I ve II kullanılmıştır. Agregalar tane boyut dağılımları Tablo 6.2'de verilmiştir. Kimyasal katkı olarak polikarboksilat esaslı bir süperakışkanlaştırıcı

kullanılmıştır. Agregalar karışım oranları ve taze beton kıvamları sabit tutulmuş, kıvamı sağlamak için kimyasal katkı dozajları değiştirilmiştir.

Tablo 6.1: Çimento, uçucu kül ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

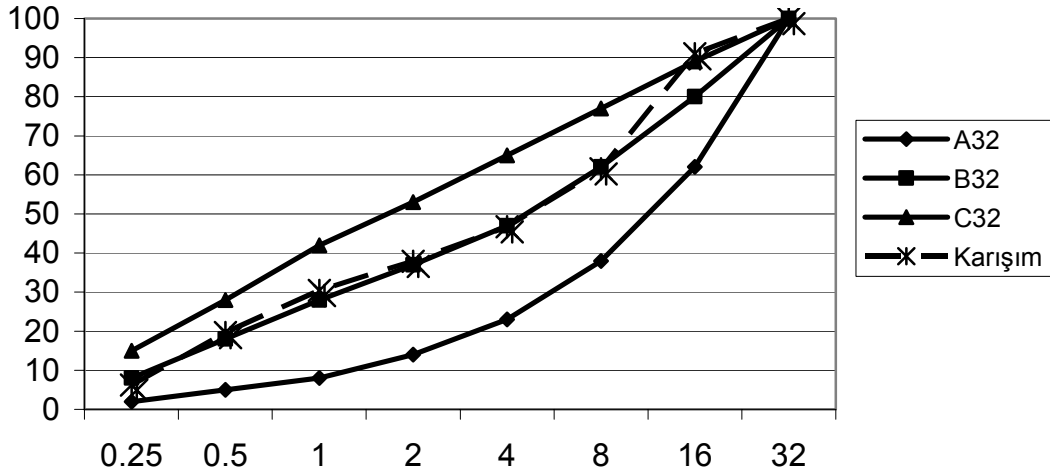
		Çimento	Uçucu kül	Silis dumanı	
Fiziksel özellikler	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.17	2.24	2.24	
	İncelik	45µ'dan geçen (%)	91.6	93.4	25.0
		Özgül yüzey (cm ² /g)	3560	5350	1010 (20100)
	Basınç Dayanımı, MPa	2-gün	28.6	-	-
		7-gün	44.0	-	-
		28-gün	55.2	-	-
	Priz süresi (s:dak)	Başlama	2:37	-	-
Bitme		3:08	-	-	
Dayanım aktivite indeksi (%)	7-gün	-	101.3	-	
	28-gün	-	113.8	-	
Kimyasal özellikler	Silisyum dioksit (SiO ₂)	20.41	59.29	92.48	
	Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	4.72	16.76	0.38	
	Ferrik oksit (Fe ₂ O ₃)	3.70	10.97	0.69	
	Kalsiyum oksit (CaO)	65.08	3.06	0.77	
	Magnezyum oksit (MgO)	0.92	5.43	1.16	
	Sülfür trioksit (SO ₃)	2.56	0.60	0.21	
	Sodyum oksit (Na ₂ O)	0.34	0.74	0.85	
	Potasyum oksit (K ₂ O)	0.81	1.80	0.78	
	Serbest kireç	1.20	0.00	0.00	
	Kızdırma kaybı (%)	1.39	0.02	2.11	
	Bogue karma oksitleri	C ₃ S	60.57	-	-
		C ₂ S	12.91	-	-
		C ₃ A	6.26	-	-
		C ₄ AF	11.26	-	-

Tablo 6.2: Agregaların tane boyut dağılımları ve özgül ağırlıkları

Elek boyutu (mm)	Elekten geçen malzeme (%)								Özgül ağırlık (kg/m ³)
	0.25	0.50	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0	31.5	
Kum	6	53	86	98	100	100	100	100	2600
Kırnakum	20	36	53	73	100	100	100	100	2700
Kırnataş I	0	0	0	0	7	65	100	100	2720
Kırnataş II	0	0	0	0	0	1	70	100	2720

Agregalar TS 706 EN 12620 (2003) B referans eğrisine yakın bir karışım verecek şekilde aşağıdaki oranlarda karıştırılmıştır (Şekil 6.1):

Kum : %20
 Kırmakum : %25
 Kırmataş I : %25
 Kırmataş II : %30



Şekil 6.1: Karışım agregata tane boyut dağılımı ve referans eğrileri

6.2 Beton Bileşimlerinin Tasarımı

6.2.1 Değişkenler ve Sınırlarının Belirlenmesi

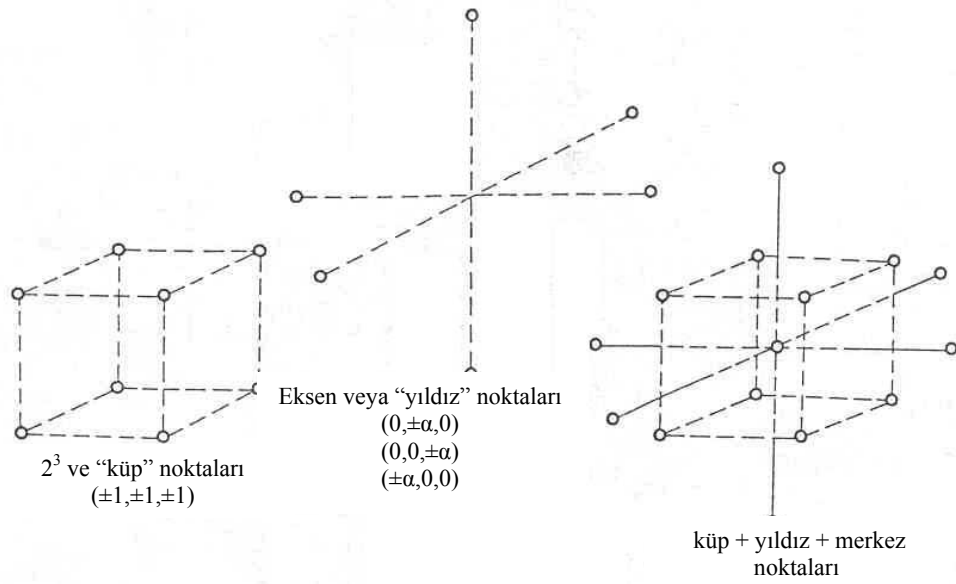
Bu çalışmada “merkezi kompozit tasarım” (MKT) adında bir istatistiksel yöntem kullanılmıştır. Karışım parametrelerinden toplam bağlayıcı miktarı (x_1), su/bağlayıcı oranı (x_2) ve uçucu kül(veya silis dumanı)/bağlayıcı oranı (x_3) olmak üzere üç adet bağımsız değişken seçilmiştir. Üretilen betonların özellikleri havada ve suda kür edilmesi durumu için ayrı ayrı incelenmiştir. Bağımsız değişkenlerin sınırları sırasıyla x_1 ; 300kg/m³-400kg/m³, x_2 ; uçucu kül kullanıldığında 0.46 – 0.60, silis dumanı kullanıldığında 0.48 – 0.58, x_3 ise uçucu kül için 0.10 – 0.40, silis dumanı için 0.03 – 0.12 olarak belirlenmiştir. Sayısal değişkenlerin aralıkları ve kodlanmış değerleri Tablo 6.3’te verilmiştir. İncelen aralıklar arasındaki herhangi bir değer kodu aşağıdaki denklem ile belirlenebilir.

$$\text{Kodlanmış değer} = \frac{\text{Gerçek değer} - \text{Orta değer}}{\frac{\text{Sınır değerler arasındaki fark}}{2}} \quad (6.1)$$

Tablo 6.3: Silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonlar için belirlenen değişkenler ve değişim aralıkları

Değişken		Kodlanmış değerler				
		-1.68	-1	0	1	1.68
x_1	Toplam bağlayıcı (kg/m ³)	266	300	350	400	464
x_2	S/B silis dumanlı karışımlarda	0,45	0,48	0,53	0,58	0,61
	S/B uçucu küllü karışımlarda	0.41	0.46	0.53	0.60	0.65
x_3	SD/B (%)	0	3	7,5	12	15
	UK/B (%)	0	10	25	40	50

S: Su, SD: Silis dumanı, UK: Uçucu kül



Şekil 6.2: Üç bağımsız değişkenli Merkezi Kompozit Tasarım

Merkezi kompozit tasarım yönteminde başlangıçta belirlenen bağımsız değişken sayısı incelenecek bölgenin kaç boyutlu olduğunu göstermektedir. Buna göre, iki adet bağımsız değişken seçilmesi durumunda kare, üç adet bağımsız değişken halinde ise küp şeklinde bir bölgenin incelendiği kabul edilebilir. İncelemede üretilecek bileşimlerin özellikleri ve sayısı da şu kurala göre belirlenir; k=3 adet bağımsız değişken için her değişkenin sınır değerlerinin tüm kombinasyonlarını temsil eden $2^k=8$ adet faktoryal nokta, her bir değişkenin merkez noktasından $\pm\alpha$ kadar uzaklıkta iken diğerlerinin merkezde olduğu $2k=6$ adet "eksen" noktası ve deneysel hatanın belirlenmesi amacıyla merkez noktasının 6 kere tekrarlanmasından meydana gelen toplam 20 adet karışımdan oluşur (Şekil 6.2).

6.2.2 Betonun Hazırlanması

Karışımların üretim sırası rastgele seçilmiştir. Her bir karışım 40 dm³ hacmindeki karıştırıcıda karıştırılmıştır. Yeterli işlenebilirlik için 16±2 cm çökme değeri esas alınmış ve katkı dozajı buna bağlı olarak değiştirilmiştir. Böylece çimento ağırlığına göre %0-1,4 oranlarında katkı kullanılmıştır. Bunun için her katkı dozajında kullanılan miktarla doğru orantılı olarak etki gösteren polikarboksilat esaslı bir yüksek oranda su azaltıcı katkıdan faydalanılmıştır. Yerleştirilirken vibrasyon uygulanan numuneler kalıplardan söküldükten sonra iki gruba ayrılarak yarısı 23±2⁰C sıcaklığındaki kirece doygun su içerisinde, diğer yarısı da laboratuvar koşullarında (% 65±5 B.N. ve 22±2⁰C sıcaklıkta) havada 90 gün boyunca saklanmıştır. Numuneler korozyon ölçümleri için 10 x 20 cm'lik silindir (lolipop), diğer deneyler için 15 x 15 x 15 cm boyutlu küp ve 7 x 7 x 28 cm boyutlu prizma şeklinde hazırlanmıştır.

6.3 Deney Yöntemleri

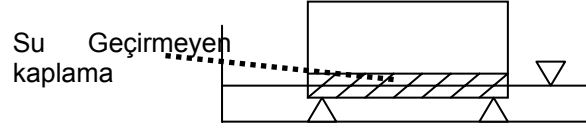
Her iki kür grubu üzerinde de basınç dayanımı, kılcal su emme, basınçlı su geçirimsizliği, hızlı klorür geçirimsizliği, yüzeyden su emme deneyleri (ISAT) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, boşluk yapısını incelemek amacıyla yapılan cıvalı porozimetre deneyleri, taze haldeyken 4 mm elekten elenmiş ve kalıplara yerleştirilmiş harç fazları üzerinde yapılmıştır.

6.3.1 Kılcal su emme

Beton içerisindeki kılcal boşlukların, çelik donatı etrafındaki nem içeriğini belirlemede ayrıca değişik zararlı bileşiklerin (klor tuzları gibi) beton içinde taşınmasında oldukça önemli bir etkisi olmasından dolayı kılcallık katsayısı (k) çok önemli bir parametredir. Deneyde, etüv kurusu haline getirilen numunelerin kontrol edilen bir alandan Şekil 6.3'te görüldüğü gibi kılcal boşluklar vasıtasıyla su emmesi sağlanmıştır. Numuneler belirli aralıklarla tartılarak emilen su miktarı belirlenmiştir. Kılcallık katsayısı aşağıdaki bağıntıdan faydalanarak hesaplanmıştır (6.2).

$$q^2 = k \cdot t \quad (6.2)$$

Burada q birim alandan emilen su miktarını (cm^3/cm^2), t ise su emme süresini (dak.) göstermektedir.



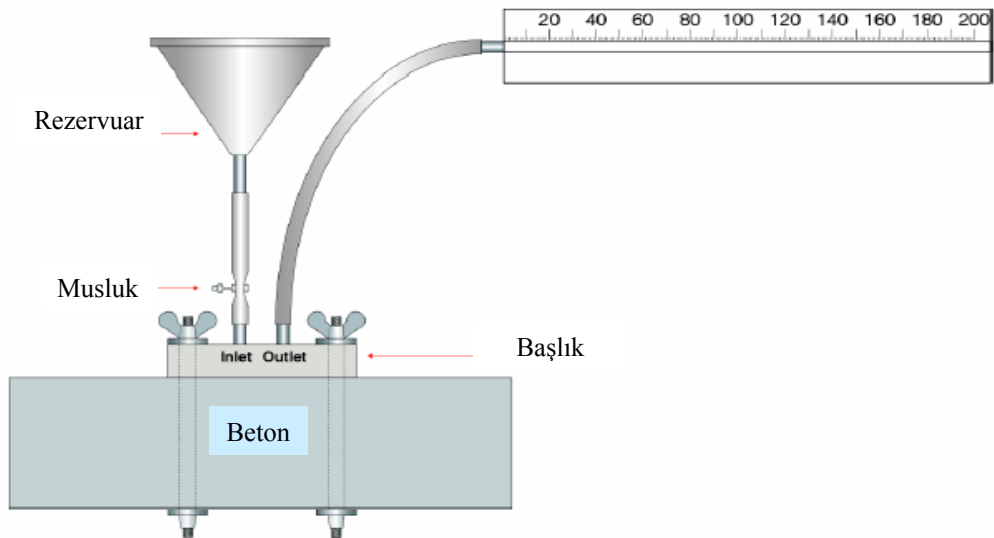
Şekil 6.3: Kılcallık Deneyi

6.3.2 Basıncılı su geçirimsizliği

Beton geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesinde basınçlı su etkisi altında su işleme derinliğinin ölçülmesi gerektiği için TS EN 12390-8 (2002) numaralı standarda uygun olarak sertleşmiş beton numuneleri etüv kurusu hale getirildikten sonra 72 saat süresince 5 bar su basıncı altında tutulmuştur. Deney sonunda ortadan ikiye yarılan numuneler içerisine basınç altında işleyen su derinliği ölçülmüştür.

6.3.3 Yüzeiden Su Emme Deneyi

Yağmur gibi beton yüzeyinde biriken suların beton içerisine girişini incelemek amacıyla geliştirilen yöntemde betonun birim alandan emdiği su zamana bağlı olarak şekil 6.4'te gösterilen sistem kullanılarak bulunmuştur. Yöntem, BS 1881 : part 208 : (1996) numaralı standartta detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 6.4: Yüzeiden su emme deneyi (Initial Surface Absorption Test)

6.3.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi

ASTM C 1202 standardı esaslarına uygun olarak hazırlanacak karışımların klorür geçirimsizlik karakterleri bulunmuştur. Toplam 6 saat süren deney sonunda numuneden geçen toplam akım, akım-zaman grafiği altında kalan alan hesaplanarak (Coulomb) belirlenmiştir.

6.3.5 Cıvalı Porozimetre Deneyi

Üretilen betonların ölçülen geçirimsizlik özellikleri ile boşluk yapısı ilişkisinin belirlenmesi amacıyla Cıvalı Porozimetre deney yöntemi kullanılmıştır. İ. T. Ü. Kimya – Metalurji Fakültesi'nde gerçekleştirilen deney yönteminin esası, cıvanın yüzey gerilimine bağlı olarak uygulanan her basınç için girebileceği bir boşluk boyutu olması ve cihazın haznesinde azalan cıva miktarına bağlı olarak toplam boşluk oranı ve dağılımının bulunmasına dayanır. Ayrıca boşlukların silindirik olduğu kabul edilerek ortalama ve kritik boşluk yarıçapı gibi değerler de belirlenebilmektedir.

Deneysel çalışmada betonların geçirimsizliklerinin ölçülmek istenmesi nedeniyle aynı numunelerin boşluk yapısının belirlenmesi zorunluluğunu doğurmuştur. Ancak, ölçüm aleti hücresinin (yaklaşık 1 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde) küçük boyutta olması gibi teknik nedenlerden dolayı numunelerde iri agrega bulunması yüksek oranda sapmalara neden olabilmektedir. Bundan dolayı cıvalı porozite deneylerinin harç fazları üzerinde yapılması daha doğru bulunmuştur. İkinci bir seri olarak harç üretiminin kıvam bakımından sorunlar yaratabileceği düşünülerek bu konuda yapılmış çalışmalarda da görülebileceği gibi taze beton, 4 mm elekten elenerek ayrı kalıplara yerleştirilmiştir (Yang ve Chiang, 2005) (Poon ve diğ., 1997) (Ramezani pour ve Malhotra, 1995). Çıkarılan harç numuneler de betonlarla birlikte aynı koşullarda saklanmış ve aynı yaşlarda ölçümler gerçekleştirilmiştir.

6.3.6 Korozyon Hızı Ölçümleri

Geçirimsizlik deneyleri sonunda gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda hem uçucu küllü hem de silis dumanlı karışımlarda en yüksek ve en düşük klorür ve su geçirimsizliğine sahip betonlar belirlenmiştir. Bu betonlar üretilerek 100 x 200 mm boyutlarında silindir kalıplara içerisine $\Phi 10$ nervürlü çelik gömülerek yerleştirilmiş,

90 gün boyunca uygun Şekilde kr edildikten sonra 1 M NaCl czltisi içerisinde ıslanma kuruma cevrimlerine tabi tutulmuştur. Her cevrim sonucunda lineer polarizasyon yöntemini uygulayan Gecor 8 korozyon ölçüm cihazı kullanılarak, gömülü celik donatıların korozyon hızları, yarı hücre potansiyelleri ve gömülü oldukları betonların özdirençleri ölçülmüştür (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: Gecor 8 korozyon ölçüm cihazı

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Deneyleerde ölçülen porozite, 90 günlük basınç dayanımı, toplam geçen akım miktarı (ASTM C 1202), yüzeyden su emme hızı (ISAT – BS 1881), kılcallık katsayısı, boşluk oranı ve basınç altında su işleme derinliği özelliklerinin her biri için regresyon denklemleri; toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı olarak belirlenen bağımsız değişkenler cinsinden bulunmuştur. Bu çalışmada, istatistiksel tasarım ve analiz için hazır bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu programa göre bağımsız değişkenler olarak;

- Toplam bağlayıcı miktarı (Çimento + uçucu kül veya silis dumanı)
- Su/Toplam bağlayıcı oranı
- Puzolan (uçucu kül veya silis dumanı)/Toplam bağlayıcı oranı seçilmiştir.

Deneyle çıktıları (sonuçları) olarak aşağıdaki özellikler ölçülmüştür:

- 90 günlük basınç dayanımı
- Porozite
- Hızlı klorür geçirimsizliği (toplam geçen akım miktarı)
- Su emme hızı (yüzeyden su emme (ISAT) deneyi)
- Kılcallık
- Basınçlı su geçirimsizliği

Kullanılan istatistiksel analiz programı, her bir ölçülen özelliğin bileşim parametreleri cinsinden yüzey denklemlerini çıkarmakta, ayrıca değişkenlerin, özellik üzerinde anlamlı bir etkisinin olup olmadığını varyans analizi (ANOVA)

yaparak belirlemektedir. Varyans analizinde hesaplanan Prob>F değerinin 0,05'ten küçük olması halinde o değişkenlerin anlamlı, yani deney sonucu üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Aşağıda uçucu kül ve silis dumanı katkılı karışımlar ayrı ayrı ele alınacaktır

7.1 Silis Dumanı İçeren Karışımlar

Puzolan olarak silis dumanı içeren ve havada saklanan beton karışımlarına ait bileşim parametreleri ve deney sonuçları Tablo 7.1 (toplam boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği) ve 7.2'de (yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı geçirimsizlik), su kürü uygulanan beton karışımlarına ait benzer deney sonuçları ise Tablo 7.3 ve 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.1: Açıkta saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait bileşim, boşluk oranı (porozite), 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>SD/B</i>	<i>Porozite (%)</i>	<i>B. dayanımı (MPa)</i>	<i>HKG (Coulomb)</i>
1	350	0,45	0,075	16.5	49,0	448
2	350	0,53	0,075	19.7	37,6	2033
3	350	0,61	0,075	19.0	37,5	3966
4	434	0,53	0,075	15.3	49,6	1848
5	350	0,53	0,075	19.7	39,0	2154
6	400	0,58	0,03	20.0	40,0	4295
7	400	0,48	0,12	16.4	47,4	1224
8	350	0,53	0,15	18.3	39,5	1063
9	300	0,58	0,03	18.2	37,9	4829
10	350	0,53	0,075	19.7	38,4	2179
11	400	0,58	0,12	19.0	41,1	2403
12	350	0,53	0,075	19.3	42,4	2259
13	300	0,58	0,12	18.0	41,6	1330
14	400	0,48	0,03	16.2	45,1	2804
15	350	0,53	0,075	19.3	40,4	2120
16	350	0,53	0,075	19.3	41,1	2159
17	350	0,53	0	19.3	38,7	4501
18	266	0,53	0,075	15.9	52,1	778
19	300	0,48	0,12	17.5	47,7	644
20	300	0,48	0,03	18.8	48,1	1569

HKG: Hızlı klorür geçirimsizliği ASTM C 1202

Tablo 7.2: Açıkta saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait bileşim, yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı su geçirimsizliği deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>SD/B</i>	<i>ISAT (ml/m²/dak)</i>	<i>Kılcallık k. (x10⁻⁶cm²/dak)</i>	<i>Geçirimsizlik (mm)</i>
1	350	0,45	0,075	0,224	49	45
2	350	0,53	0,075	0,453	211	74
3	350	0,61	0,075	0,698	493	84
4	434	0,53	0,075	0,609	304	73
5	350	0,53	0,075	0,458	231	70
6	400	0,58	0,03	0,839	765	91
7	400	0,48	0,12	0,344	161	57
8	350	0,53	0,15	0,359	199	71
9	300	0,58	0,03	0,469	247	86
10	350	0,53	0,075	0,464	255	75
11	400	0,58	0,12	0,828	557	63
12	350	0,53	0,075	0,380	259	71
13	300	0,58	0,12	0,333	115	61
14	400	0,48	0,03	0,422	197	60
15	350	0,53	0,075	0,388	239	72
16	350	0,53	0,075	0,407	240	69
17	350	0,53	0	0,438	249	79
18	266	0,53	0,075	0,232	62	50
19	300	0,48	0,12	0,180	24	30
20	300	0,48	0,03	0,250	47	47

ISAT: Yüzeyden su emme BS 1881: bölüm 5

Silis dumanı katkılı betonlarda su kürünün etkisi, Tablo 7.1 ile Tablo 7.3 karşılaştırıldığında belirgin şekilde görülmektedir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında açıkta saklanan numunelerin boşluk oranlarının, 90 gün süresince suda saklanan numunelere kıyasla %14 – %62 oranında arttığı, 90 günlük basınç dayanımlarının %2,4 – %13,4 oranında azaldığı, hızlı klorür geçirimsizliklerinin ise 1,04 – 3,4 kat yükseldiği anlaşılmaktadır. Hızlı klorür geçirimsizliklerinin diğer beton özelliklerine nazaran kür koşullarına daha duyarlı olması, su kürünün boşluk miktarı ve yapısını olumlu anlamda geliştirmesinin yanında – özellikle puzolan katkılı betonlarda – betonun elektriksel direncinin de önemli oranda artmasından kaynaklanmaktadır (Shi ve diğ., 1998) (Shi, 2004).

Tablo 7.2 ve 7.4'te de aynı şekilde, sırasıyla, havada ve suda saklanan betonların yüzeyden su emme hızı, kılcal su emme katsayısı ve basınç altında su işleme derinliği değerleri gösterilmiştir. Yüzeyden su emme deneyinde gerçekleştirilen ölçümlerden ilki, onuncu dakikada ölçülen su emme hızı değerlendirmeye alınmıştır. Silis dumanı katkılı betonların çeşitli su geçirimsizlik değerleri de su kürü

uygulanması halinde boşluk yapısındaki değişime bağlı olarak azalmıştır. Havada saklanan numunelerde su kürü uygulanmışlara göre YSE (ISAT) değerlerinde %8 – %54, kılcallık katsayısında %35 – %184 ve basınçlı geçirimsizlik değerlerinde %9 – %54 arasında değişen oranlarda artışlar elde edilmiştir.

Tablo 7.3: Suda saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait bileşim, boşluk oranı (porozite), 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>SD/B</i>	<i>Porozite (%)</i>	<i>B. dayanım (MPa)</i>	<i>HKG (Coulomb)</i>
1	350	0,45	0,075	13,7	50,9	431
2	350	0,53	0,075	15,5	42,1	783
3	350	0,61	0,075	16,6	41,3	1168
4	434	0,53	0,075	11,9	53,2	719
5	350	0,53	0,075	15,5	42,0	736
6	400	0,58	0,03	16,2	44,1	2488
7	400	0,48	0,12	13,8	49,9	424
8	350	0,53	0,15	14,5	42,7	361
9	300	0,58	0,03	15,6	40,9	1784
10	350	0,53	0,075	15,5	41,8	710
11	400	0,58	0,12	14,8	42,4	957
12	350	0,53	0,075	14,5	44,9	776
13	300	0,58	0,12	14,0	43,9	431
14	400	0,48	0,03	12,6	48,1	1755
15	350	0,53	0,075	14,5	43,0	701
16	350	0,53	0,075	14,5	42,2	792
17	350	0,53	0	16,5	44,7	3188
18	266	0,53	0,075	11,0	53,4	378
19	300	0,48	0,12	11,1	49,2	256
20	300	0,48	0,03	11,6	51,4	686

HKG: Hızlı klorür geçirimsizliği ASTM C 1202

Diğer taraftan, su kürü uygulanan karışımlarda incelenen özellikler büyükten küçüğe sıralandığında, üretilen karışımlardan silis dumanı içermeyen betonun basınç dayanımı 44,7 MPa ile tüm karışımlar arasında orta değer üzerinde yer alırken aynı betonun geçirimsizlik değerleri ve toplam boşluk oranı ya en kötü ya da en kötülerden biri olarak göze çarpmaktadır. Başka bir deyişle, basınç dayanımı silis dumanı içermeyen betondan düşük olan birçok SD katkılı betonun geçirimsizliği de daha düşük bulunmuştur. Buna göre, dayanıklı bir beton üretmek için mutlaka yüksek dayanıma sahip olması gerekmediği veya her yüksek dayanıma sahip betonun dayanıklı olmayabileceği burada bir daha ortaya çıkmıştır.

Tablo 7.4: Suda saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait bileşim, yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı su geçirimsizliği deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>SD/B</i>	<i>ISAT (ml/m²/dak)</i>	<i>Kılcallık k. (x10⁻⁶cm²/dak)</i>	<i>Geçirimsizlik (mm)</i>
1	350	0,45	0,075	0.146	35	39
2	350	0,53	0,075	0.297	132	54
3	350	0,61	0,075	0.526	230	62
4	434	0,53	0,075	0.536	158	62
5	350	0,53	0,075	0.310	135	52
6	400	0,58	0,03	0.677	510	65
7	400	0,48	0,12	0.318	105	43
8	350	0,53	0,15	0.297	70	54
9	300	0,58	0,03	0.398	127	64
10	350	0,53	0,075	0.323	138	52
11	400	0,58	0,12	0.573	366	45
12	350	0,53	0,075	0.338	138	54
13	300	0,58	0,12	0.253	64	54
14	400	0,48	0,03	0.391	146	55
15	350	0,53	0,075	0.333	137	55
16	350	0,53	0,075	0.336	146	52
17	350	0,53	0	0.354	165	68
18	266	0,53	0,075	0.150	27	43
19	300	0,48	0,12	0.139	17	24
20	300	0,48	0,03	0.168	27	30

ISAT: Yüzeyden su emme BS 1881: bölüm 5

7.1.1 İstatistiksel Değerlendirme

Bu çalışmada, tasarım ve analiz için hazır bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Boşluk oranı, hızlı klorür geçirimsizliği, 90 günlük basınç dayanımı, yüzeyden su emme hızı, kılcal su emme katsayısı ve basınç altında su işleme derinliği değerleri ayrı ayrı modellenmiştir. Değişkenlerin anlamlılığı, her model üzerine etkisi ve birbirleri arasındaki ilişkileri varyans analizi (ANOVA) ile hesaplanmıştır.

Laboratuvar ortamında havada tutulan, kür uygulanmayan SD katkılı betonların varyans analizi sonuçları Tablo 7.5 ve 7.6'da görülmektedir. Tablolarda verilen varyans analizinde hesaplanan Prob>F değerinin 0,05'ten küçük olması halinde o değişkenin anlamlı, yani deney sonucu üzerinde etkili olduğu anlaşılmalıdır. Anlamlı değişkenler tabloda koyu renkte yazılmıştır. Tüm modellerde anlamlı olmayan parametreler modelin anlamlılığını artırmak amacıyla denklemden çıkarılmıştır; ancak kendi başına anlamlı olmasa da diğer parametrelerle etkileşim içerisinde olanlara dokunulmamıştır.

Tablo 7.5: Açıkta saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve HKG deneylerinin varyans analizi sonuçları

<i>Değişken</i>	<i>Boşluk oranı</i> ($R^2=0.90$)		<i>Basınç Dayanımı</i> ($R^2=0.88$)		<i>HKG</i> ($R^2=0.93$)	
	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>
Model	27.98	< 0.0001	37.25	< 0.0001	42.54	< 0.0001
x_1	1.18	0.2962	1.02	0.3289	10.87	0.0058
x_2	35.87	< 0.0001	64.63	< 0.0001	98.94	< 0.0001
x_3	5.15	0.0409	-	-	117.86	< 0.0001
x_1^2	94.64	< 0.0001	80.49	< 0.0001	7.40	0.0175
x_2^2	13.09	0.0031	6.24	0.0246	-	-
x_3^2	-	-	-	-	9.56	0.0036
$x_1 * x_2$	23.44	0.0003	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	8.96	0.0104

Tablo 7.6: Açıkta saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık ve basınçlı su geçirimsizliği deneylerinin varyans analizi sonuçları

<i>Değişken</i>	<i>ISAT</i> ($R^2=0.95$)		<i>Kılcallık katsayısı</i> ($R^2=0.89$)		<i>Geçirimsizlik</i> ($R^2=0.88$)	
	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>
Model	85.96	< 0.0001	38.43	< 0.0001	21.66	< 0.0001
x_1	139.27	< 0.0001	54.27	< 0.0001	20.34	0.0007
x_2	177.25	< 0.0001	79.49	< 0.0001	82.52	< 0.0001
x_3	7.57	0.0148	4.63	0.0481	20.71	0.0007
x_1^2	-	-	-	-	12.08	0.0046
x_2^2	-	-	-	-	7.22	0.0197
x_3^2	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_2$	19.76	0.0005	15.34	0.0014	5.15	0.0425
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	5.15	0.0425

Su kürü uygulanmayan beton özelliklerinin varyans analizi sonuçlarına göre toplam bağlayıcı miktarı (x_1) çeşitli su ve klorür geçirimsizlikleri üzerinde (Tablo 7.5 ve 7.6) tek başına ve doğrusal olarak etkili iken boşluk oranı ve basınç dayanımı üzerinde ikinci derece halleri etkili olmuştur. Ayrıca toplam bağlayıcı miktarı ve S/B oranının basınç dayanımı ve HKG dışındaki diğer özellikler üzerinde etkileşim içerisinde (interaction) bulunmaları söz konusudur. Su/bağlayıcı oranı (x_2) beklendiği üzere tüm özellikler üzerinde birinci derecede ve yüksek oranda etkili bulunmuş ($Prob>F < 0.0001$), buna ek olarak ikinci derece halinin boşluk oranı, basınç dayanımı ve basınçlı su geçirimsizliği üzerinde etkisi saptanmıştır. Bundan başka, S/B oranının basınçlı su geçirimsizliği ve HKG üzerinde, silis dumanı/bağlayıcı oranı (x_3) ile birlikte etkileşim halinde etkisi görülmüştür. SD/B oranı ise basınç dayanımı hariç tüm özellikler üzerinde doğrusal olarak etkili iken ikinci derece hali sadece HKG

üzerinde etkili bulunmuştur. Başta silis dumanı olmak üzere genel olarak puzolanların HKG deneyi üzerinde görülen ve diğer geçirimsizlik özelliklerine oranla yüksek olan etkisinin, beton boşluk suyu kimyasında yaptığı değişikliklerden kaynaklandığı bilinmektedir (Lui ve Beaudoin, 2000) (Andrade, 1993). Gerçekten de puzolanlar beton boşluk suyundaki OH⁻ iyonlarını tespit ederek HKG deneyi sırasında akım taşıyan iyon miktarını azaltarak toplam geçen akım değerini düşürmektedir.

Tablo 7.7: Suda saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği deneylerinin varyans analizi sonuçları

Değişken	Boşluk oranı ($R^2=0.88$)		Basınç Dayanımı ($R^2=0.88$)		HKG ($R^2=0.90$)	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	28.32	< 0.0001	36.10	< 0.0001	45.15	< 0.0001
x_1	8.64	0.0108	0.052	0.8223	11.93	0.0035
x_2	52.96	< 0.0001	64.47	< 0.0001	18.43	0.0006
x_3	6.33	0.0247	-	-	114.05	< 0.0001
x_1^2	69.08	< 0.0001	77.90	< 0.0001	-	-
x_2^2	-	-	4.81	0.0445	-	-
x_3^2	-	-	-	-	36.17	< 0.0001
$x_1 * x_2$	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	4.61	0.0497	-	-	-	-

Tablo 7.8: Suda saklanan SD katkılı beton karışımlarına ait yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık ve basınçlı su geçirimsizliği deneylerinin varyans analizi sonuçları

Değişken	ISAT ($R^2=0.95$)		Kılcallık katsayısı ($R^2=0.81$)		Geçirimsizlik ($R^2=0.78$)	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	105.25	< 0.0001	20.59	< 0.0001	17.62	< 0.0001
x_1	163.91	< 0.0001	33.83	< 0.0001	11.83	0.0036
x_2	139.81	< 0.0001	33.08	< 0.0001	33.70	< 0.0001
x_3	12.02	0.0032	4.77	0.0452	13.12	0.0025
x_1^2	-	-	-	-	-	-
x_2^2	-	-	-	-	-	-
x_3^2	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_2$	-	-	10.66	0.0052	11.83	0.0037
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-	-

Kalıplarda çıkarıldıktan sonra 90 gün süresince kirece doygun su içerisinde tutulan betonlarda ise (Tablo 7.7 ve 7.8), su kürü uygulanmayanlardan farklı olarak; toplam bağlayıcı miktarı porozite üzerinde etkili hale gelmiştir. Ayrıca hızlı klorür geçirimsizliği üzerindeki toplam bağlayıcı miktarının ikinci dereceden (kuadratik)

etkisi ve S/B ile SD/B oranlarının ikili etkisi ortadan kalkmış, yüzeyden su emme (ISAT) deneyinde ise su kürü uygulandığında toplam bağlayıcı miktarı ile S/B oranının ikili etkisi kaybolmuştur. Kılcallık üzerinde anlamlı olan faktör sayısı değişmezken basınçlı geçirimsizlik üzerinde etkili faktör sayısı su kürü uygulandığında azalmıştır. Toplam bağlayıcı miktarı ile SD/B oranının ikili etkisi hiçbir kür koşulunda beton özelliklerini etkilememiştir.

Uygun şekilde kür uygulanmayan betonların bazı özellikleri üzerinde anlamlı olan bağlayıcı miktarı ile S/B oranının ikili etkisinin, su kürü uygulandığında ya azalma ya da ortadan kalkma eğiliminde olduğu görülmüştür. Çünkü su kürü uygulandığında silis dumanının puzolanik reaksiyonu tamamlanabildiği için anlamlılığı çeşitli şekillerde (birinci derece, ikinci derece ve/veya diğer faktörlerle etkileşim içerisinde) artarak bağlayıcı miktarı ile S/B oranının ikili etkisinin yerine geçmektedir. Havada saklanan betonlarda silis dumanının etkisinin azalmaması ise yüksek reaktivitesi nedeniyle çimentonun hidrasyon reaksiyonunu – silis dumanı içermeyenlere kıyasla – hızlandırmasından kaynaklandığı söylenebilir (**Diamond, 1983**) (**Christensen ve diğ., 1992**).

Beton bileşenlerinin anlamlılıklarını belirlemede varyans analizi sonuçları son derece faydalı olsa da beton özelliğini ne yönde değiştirdiği anlaşılamamaktadır. Diğer taraftan elde edilen regresyon denklemlerindeki faktörlerin farklı mertebelerde olması nedeniyle katsayılara bakarak etkinliklerini değerlendirmek de doğru olmayacaktır. Bu nedenle beton bileşenlerinin etkinliklerinin dereceleri ve yönlerini birlikte değerlendirmek için Tablo 7.5 – 7.8’de verilen varyans analizi sonuçlarıyla Tablo 7.9 ve 7.10’da verilen modellerin katsayılarının birarada gözönüne alınması en doğru yaklaşım olacaktır. Buna göre, toplam bağlayıcı miktarının artışı (ikinci dereceden ve ikili etkileri de hesaba katılınca) tüm beton özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. İncelenen beton dayanımlarının çok yüksek sınıflarda olmaması nedeniyle agrega fazına göre (boşluk yapısı, geçirimsizliği ve dayanımı açısından) çok daha düşük seviyede olan matris fazı miktarındaki artışın beton özelliklerini olumsuz şekilde değiştirmesi anlaşılabilir. S/B oranındaki artışların beklendiği üzere önceki bileşenden çok daha yüksek dereceden olumsuz etkisi görülmüştür. Bağlayıcı içerisindeki silis dumanı miktarının artış etkisi ise biraz karmaşıktır. İlk olarak, basınç dayanımı üzerinde hiçbir etkisi görülmediğinden dolayı ilgili modelden çıkarılmıştır. Havada tutulan betonların basınç altında su işleme derinliği, S/B oranı

0,45'in üzerinde olması şartıyla ve diğer tüm su geçirimsizlik özellikleri, her iki kür koşulunda, artan SD/B oranıyla birlikte azalmıştır (Tablo 7.10). HKG deneyinde ise silis dumanı artışı her bir kür koşulunda birbirine zıt şekilde etki göstermiştir. Açıkta saklanan numunelerde puzolanik reaksiyonun tamamlanmamasından dolayı artan silis dumanının S/B oranı mertebesinde etkisi varken aynı betonların suda saklananlarında S/B oranı etkisi beşte birine (katsayılarıdaki değişim) düşmüş, SD/B oranı etkisi meritebe değiştirmeden yön değiştirmiştir. Yani, su kürü uygulanan betonlarda SD/B oranındaki artışın HKG deneyinde belirlenen toplam geçen akım miktarlarını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Son olarak artan SD/B oranı, havada tutulan betonların boşluk oranlarını – diğer faktörlere nazaran daha zayıf etkide olsa da – azaltmış, suda saklananları ise, S/B oranı ile etkileşim içinde, 0,48'in üzerinde olması durumunda olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Tablo 7.9: Her iki kür koşulu için SD katkılı beton karışımlarına ait boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve HKG modellerinden elde edilen fonksiyon katsayıları

<i>Değişken</i>	<i>Boşluk oranı</i>		<i>Basınç Dayanımı</i>		<i>HKG</i>	
	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>
Sabit	-36.88	-73.22	377.9	337.6	-25497	-1585
x_1	0.164	0.38	-1.051	-0.95	74.15	4.45
x_2	92.5	39.4	-508.37	-420.45	30378	5533
x_3	-6.48	99.73	-	-	42255	-42993
x_1^2	-4.8×10^{-4}	-5.3×10^{-4}	1.5×10^{-3}	1.4×10^{-3}	-0.097	-
x_2^2	-180.06	-	414.6	336.6	-	-
x_3^2	-	-	-	-	1.4×10^5	1.8×10^5
$x_1 * x_2$	0.325	-	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-205.56	-	-	-1.6×10^5	-

Tablo 7.10: Her iki kür koşulu için SD katkılı beton karışımlarına ait yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı su geçirimsizliği modellerinden elde edilen fonksiyon katsayıları

<i>Değişken</i>	<i>ISAT</i>		<i>Kılcallık katsayısı</i>		<i>Geçirimsizlik</i>	
	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>
Sabit	2.85	-1.63	4144	3204	-1111	-546.1
x_1	-0.0113	2.4×10^{-3}	-15.41	-11.04	2.311	1.478
x_2	-6.226	2.232	-8846	-6754	2504	1078
x_3	-0.696	-0.727	-786.1	-679.8	831.0	-116.4
x_1^2	-	-	-	-	-1.9×10^{-3}	-
x_2^2	-	-	-	-	-1449	-
x_3^2	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_2$	0.0265	-	33.65	23.9	-1.65	-2.6
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-1833	-

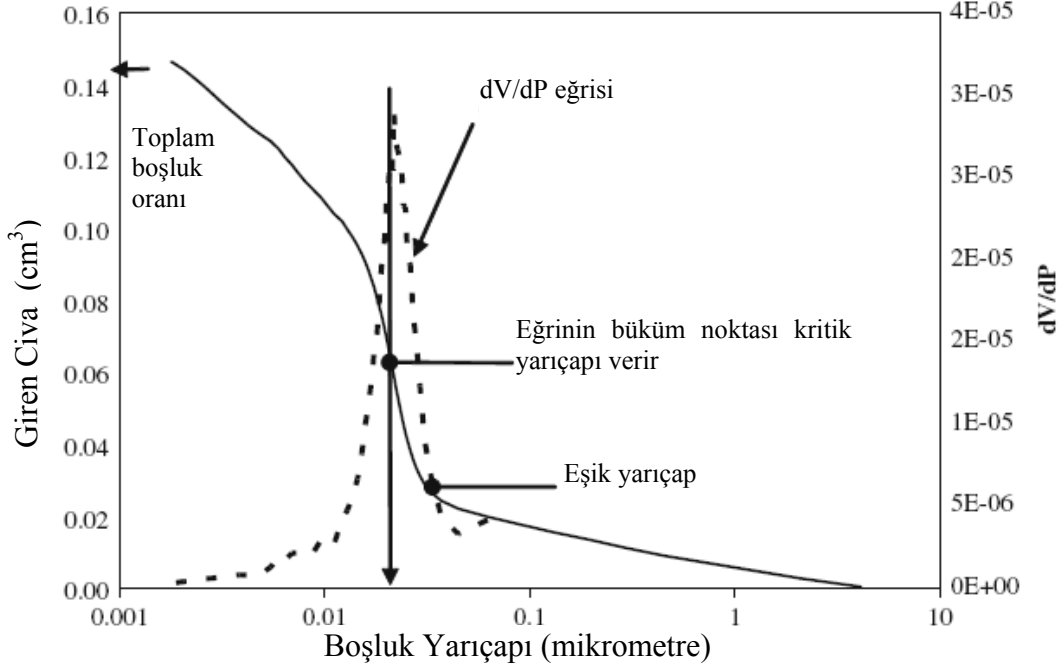
7.1.2 Civalı Porozimetre Deneyi

Bu çalışmada incelenen beton geçirimsizlik ve mekanik özellikleri, beton içerisindeki boşluk miktarı, boyutu, dağılımı ve sürekliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bundan dolayı betonun geçirimsizliği, toplam veya kılcal boşluk oranı (**Powers, 1958**), boşluk yüzey alanı, belirli bir kritik boyuttan büyük boşluk hacmi (**Goto ve Roy, 1981**), eşik veya kritik boşluk çapı/yarıçapı ile ilişkilendirilmeye çalışılmaktadır. Eşik ve kritik boşluk boyutları, civalı porozimetre yöntemiyle elde edilen boşluk boyut dağılımı verilerinden bulunan en temel parametrelerdendir. Bir diğer temel parametre olan toplam boşluk oranı ise daha çok mekanik özelliklerle ilişkilendirilmektedir (**Kumar ve Bhattacharjee, 2003**).

Civalı porozimetre deneyi sonucunda elde edilen parametreler konusunda Cook ve Hover (**1999**), eşik boşluk çapı ile kritik boşluk çapı tanımlarının aynı anlama geldiğini belirtirken, Nokken ve Hooton (**2008**) bu iki ifade için farklı tanımlamalar yapmıştır. Şekil 7.1’de görüldüğü üzere, boşluk boyut dağılım grafiği büyük boyuttaki çaptan küçüğe doğru yığışlımlı olarak gösterilmektedir. Deneyde, artan basınç miktarı küçülen boşluk boyutlarına karşılık gelmektedir. Başlangıçta boşluk miktarının eşdeğeri olan numuneye giren civa miktarı artışı, boşluk boyutu eşdeğeri olan basınç artış hızı ile doğru orantılı bir şekilde artarken belirli bir çapta, boşluklar arasındaki sürekliliğin mevcut olduğu boyutta, giren civa miktarında hızlı bir yükselme görülür. Bir süre sonra söz konusu hızlanma bir maksimum değere ulaşır ve birim basınç artışında giren civa miktarında azalma başlar. İşte bu maksimum noktaya karşılık gelen, birbirleriyle bağlantılı halde olan en yüksek miktardaki boşluk miktarının boyutuna “Kritik boşluk çapı/yarıçapı” adı verilmektedir. Kritik boşluk tanımı yukarıda bahsi geçen her iki çalışmada da aynı şekilde yapılmıştır.

Beton boşluk yapısı oldukça karmaşık ve düzensizdir. Yani civanın deneyin herhangi bir aşamasında girdiği boşluğun arkasında daha büyük çapta boşluk bulunması olağandır. Bu düzensizlik nedeniyle, civalı porozimetre deneyinde, çoğu zaman civanın küçük boşluklardan sonra ulaştığı daha büyük boşluklar da önlerindeki boşluk çapları ile birlikte sınıflandırılmaktadır. Beton doğasından kaynaklanan bu duruma “Hokka Etkisi” (Ink-Bottle Effect) adı verilir (**Moro ve Böhni, 2002**). Hokka etkisi, boşluk çapları hacimsel dağılımının değerlendirilmesinde yanlışlıklara neden olmaktadır (**Diamond, 2000**). Bu nedenle, civalı porozimetre deneylerinden

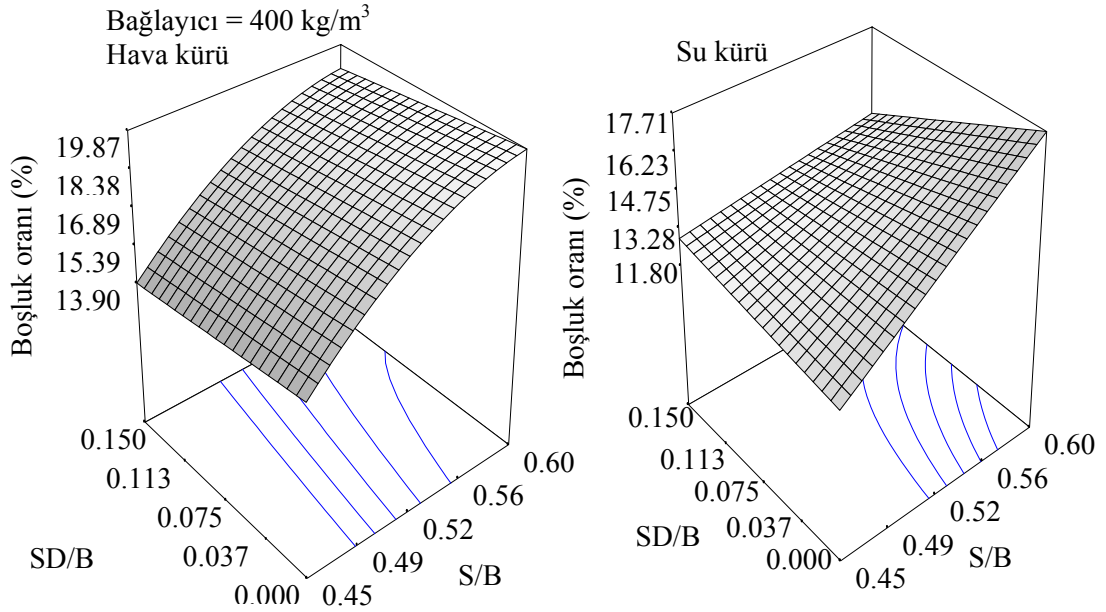
elde edilen toplam boşluk oranı ve kritik boşluk çapı haricindeki verilerin değerlendirme dışı tutulması – alternatif bir yöntem bulunmasa da – tavsiye edilmektedir.



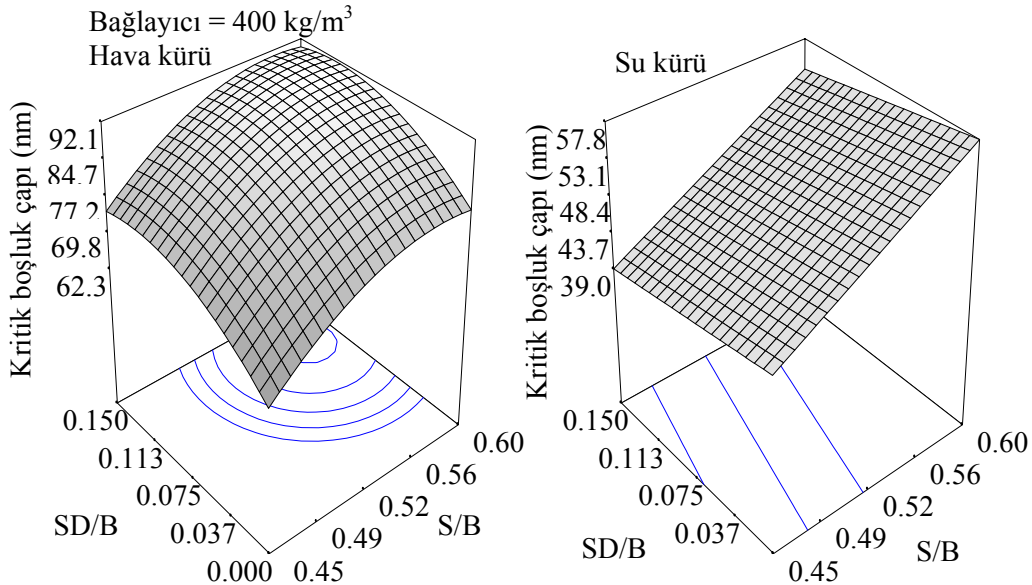
Şekil 7.1: Boşluk boyut dağılımı ve parametrelerin tanımı

Toplam 400 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonların her iki kür koşulu için çıkarılan modellerden elde edilen boşluk oranı tepki yüzeyleri Şekil 7.2’de verilmiştir. Açıkta tutularak kür uygulanmayan betonlarda S/B oranının beklenildiği gibi en etkili bileşen olduğu görülmektedir. SD/B oranının etkisi ise özellikle hava kürü numunelerinde belirgin değildir. Su kürü uygulanan numunelerde ise S/B ile SD/B oranlarının etkileşim içerisinde girmeleri sonucunda etki mekanizması değişmiştir. Bu grupta silis dumanının etkisi yüksek S/B oranlarında belirgin derecede artarken düşük S/B oranlarında etkisiz hale gelmiştir. Yüksek S/B oranlarındaki betonların suda saklanması durumunda, SD artışının hem doldurma etkisi hem de puzolanik reaksiyon sonucu toplam boşluk oranında düşüşe yol açması anlaşılabilir. Bu düşüşün kılcal boyuttaki boşluk miktarını azaltmaması, hatta daha büyük boyutları kılcal boyuta düşürerek artırması bile mümkün olabilir. Diğer taraftan düşük S/B oranına sahip betonlarda artan SD/B oranının toplam boşluk miktarı üzerindeki etkisinin belirsizleşmesi, silis dumanının doldurabileceği boyutta boşluğun kalmayıp kaybolmasından kaynaklanmaktadır. Ancak toplam boşluk oranının az miktarda

azalması bile başta kılcal yolla olmak üzere betonun geçirimsizlik özelliklerini önemli ölçüde düşürebilir. Benzer şekilde, silis dumanı içermeyen betonların S/B oranları arttıkça boşluk oranları önemli ölçüde artarken, literatürdeki silis dumanı oranlarının sınır değerlerine ulaşıldığında (%15), S/B oranı artışından kaynaklanan toplam boşluk miktarındaki yükselme silis dumanı tarafından doldurularak en düşük düzeye indirilmektedir.



Şekil 7.2: Toplam bağlayıcı miktarları 400 kg/m³ olan betonların her iki kür koşulu için elde edilen boşluk oranı tepki yüzeyleri



Şekil 7.3: Toplam bağlayıcı miktarları 400 kg/m³ olan her iki kür koşulu için elde edilen kritik boşluk çapı tepki yüzeyleri

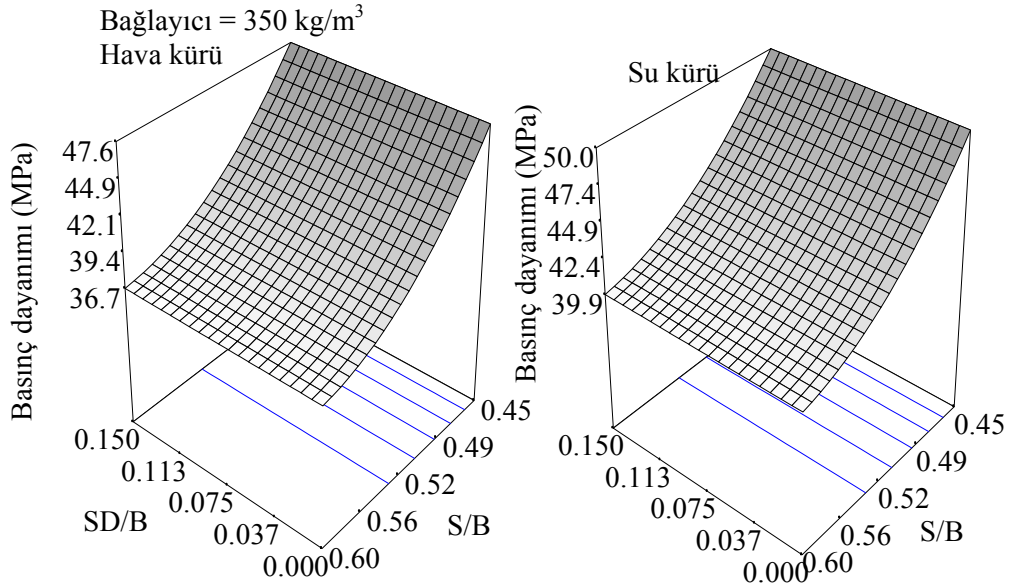
Sürekli olan boşlukların boyutunu gösteren kritik boşluk çapı için elde edilen davranış genel olarak toplam boşluk miktarı değişimi davranışına benzese de Şekil 7.3'te birtakım nüanslar görülmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0.60 olan, açıkta tutulan ve silis dumanı içermeyen karışımlarda toplam boşluk oranı en yüksek değerlere ulaşırken aynı betonlarda silis dumanı kullanım oranı arttıkça kritik boşluk çapının yükseldiği görülmüştür. Bu durumun silis dumanının filler etkisi sayesinde boşluk oranını azalttığı halde puzolanik reaksiyonun tamamlanmaması nedeniyle sürekliliğini etkilememesinden kaynaklandığı söylenebilir. Suda saklanan numunelerde ise kritik boşluk çapı için bulunan tepki yüzeyinin karakteri toplam boşluk oranı grafiği ile benzerlik göstermiştir.

7.1.3 Basınç Dayanımı Deneyi

Kür koşullarının silis dumanı katkılı betonların 90 günlük dayanımları üzerindeki etkisi Şekil 7.4'te görülmektedir. Her iki kür koşulunda da dayanım yüzeylerinin karakteri birbirine benzemektedir; ancak su küründe dayanım düzeyleri daha yüksektir. Havada saklanan ve S/B oranı 0.60 olan betonlara su kürü uygulandığında basınç dayanımları bağlayıcı miktarına bağlı olmak üzere yaklaşık %6.4-9 oranında artarken S/B oranı 0.45 seviyesine düşürüldüğünde dayanım artışı %3-5'e kadar düşmüştür. Yüksek dayanıma sahip, düşük S/B oranı ile üretilen betonlarda dökümden itibaren ilk birkaç günde kazanılan dayanımın nihai dayanıma oranının, düşük ve normal dayanımlı betonların oranlarına göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Düşük dayanımlı betonlarda 7/28 günlük basınç dayanım oranı yaklaşık %70 iken yükselen basınç dayanımıyla birlikte bu oranın ortalama %80 seviyesine çıkması hatta çok yüksek dayanımlı betonlarda daha da artması buna örnek olarak verilebilir. Bu nedenle laboratuarda açıkta bırakılan numuneler arasında düşük S/B oranı ile üretilen, yüksek dayanımlı betonların yoğun ve boşluksuz yapısının beton karma suyunun buharlaşmasını engellemesi sayesinde, yüksek S/B oranlılara kıyasla daha fazla suyun hidratasyonda kullanılarak suda saklananlarla havada tutulanlar arasındaki dayanım farkının azalması beklenen bir sonuçtur. Buna ek olarak düşük S/B oranlı betonlarda çimento tanelerinin yüksek S/B oranlılara göre daha yakın bulunması ve havada tutulan betonların kuruma sırasında gerçekleşen hidratasyonunda daha kısa sürede dolu bir yapı oluşturması, yetersiz kür uygulanan betonlarda S/B oranının etkisini arttıran bir başka unsurdur. Bu sebeple havada

tutulan betonlarda S/B oranındaki azalma dayanımda daha dik bir artışa neden olarak yüksek dayanımlı betonlarda hava kürü ile su kürü uygulanan betonların basınç dayanım oranlarını azaltmaktadır.

Ayrıca şekil 7.4'e bakıldığında silis dumanı/bağlayıcı oranının dayanım üzerinde neredeyse etkisinin olmadığı, kür koşullarının ve su/bağlayıcı oranının esas olarak etkin olduğu anlaşılmaktadır.



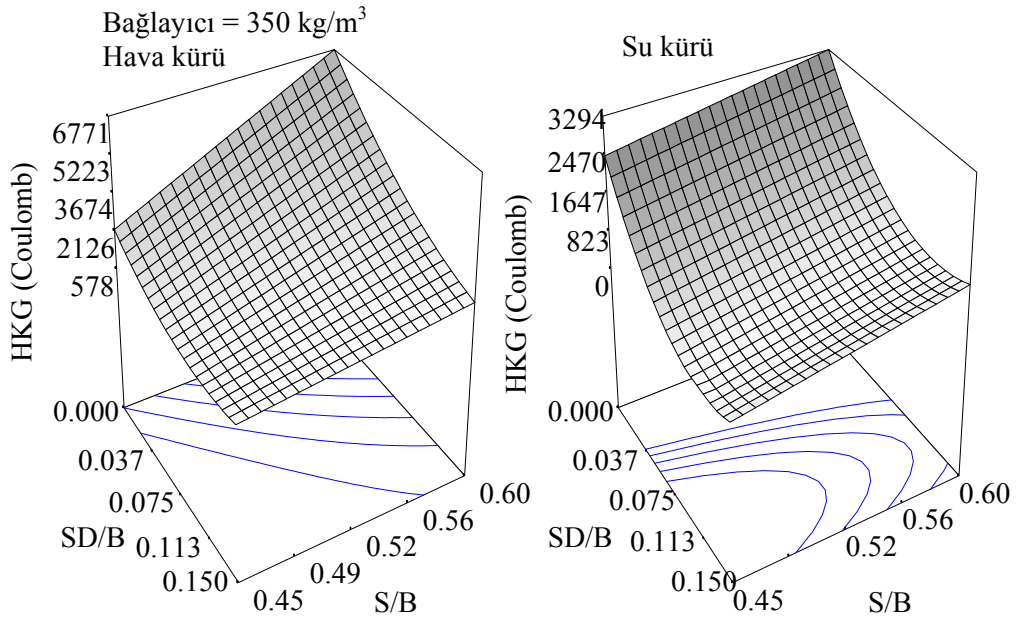
Şekil 7.4: İki kür koşulunda 350 kg/m³ bağlayıcı içeren silis dumanı katkılı betonların SD/B ve S/B oranlarının basınç dayanımına etkisi

7.1.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi

Su kürü uygulanmayan ve uygulanan betonların üzerinde gerçekleştirilen üç adet hızlı klorür geçirimsizliği deney sonucunun ortalamaları sırasıyla tablo 7.1 ve 7.3'te verilmiştir. Aynı sırayla, bu sonuçlar kullanılarak yapılan varyans analizi sonuçları da tablo 7.5 ve 7.7'de gösterilmiştir. Ardından elde edilen ve tablo 7.9'da katsayıları verilen modeller aracılığı ile 350 kg/m³ bağlayıcı içeren betonlar için çizilen grafikler ise şekil 7.5'te görülmektedir.

Varyans analizi sonuçlarında da görüldüğü gibi hızlı klorür geçirimsizliği deneyinde silis dumanının etkisi hem bağlayıcı miktarı, hem de S/B oranı etkisinden çok daha yüksek bulunmuştur. Su/bağlayıcı oranının en etkili görüldüğü betonların havada saklanan ve silis dumanı içermeyen karışımlar olduğu, şekil 7.5'te görülen grafiğin eğiminden de anlaşılmaktadır. Suda saklanan ve SD içermeyen betonlarda S/B

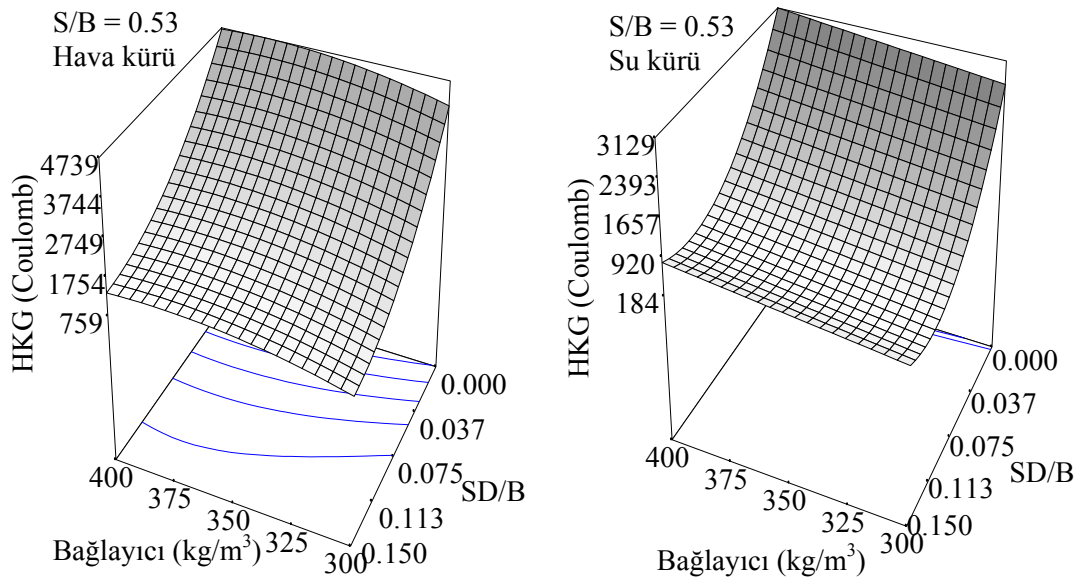
oranının 0.60'tan 0.45'e düşürülmesi halinde toplam geçen akım değerleri yaklaşık %25 oranında azalırken havada saklananlarda azalma %70'lere ulaşmaktadır. Bu durum, yukarıda basınç dayanımı konusunda da anlatıldığı gibi düşük S/B oranına sahip betonların daha yavaş kuruması dolayısıyla, hidrasyon reaksiyonu nispeten daha hızlı olan sadece portland çimentosu ile üretilen betonlarda kuruma süresince daha fazla hidrate ürün ve daha boşluksuz beton elde etmekten kaynaklanmaktadır. Kısaca SD içermeyen betonlarda düşük S/B oranı seçilmesi durumunda toplam geçen akım miktarı kür koşullarından fazla etkilenmemekte, S/B oranı 0.60'a yükseldiğinde beton 90 gün boyunca su içerisinde tutulmazsa geçirimsizliğinin 2 kat artacağı görülmektedir. Bu nedenle silis dumanı kullanılmayan ve açıkta saklanan betonlarda S/B oranının oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.5: İki kür koşulunda 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren silis dumanı katkı betonların SD/B ve S/B oranlarının klorür geçirimsizliğine etkisi

Silis dumanının beton içerisine girmesiyle birlikte kontrolü de ele aldığı, özellikle su kürü uygulanan betonlarda bir optimum değere kadar artan silis dumanının S/B oranından bağımsız bir şekilde hızla Coulomb değerlerini düşürdüğü görülmektedir. Suda saklanan betonlarda görülen yaklaşık %11-12 seviyesindeki optimum SD/B oranının havada saklananlarda %15'lere kadar belirgin bir şekilde görülmemesi, puzolanik reaksiyon sonucu sağlanan beton iç yapısındaki doluluğun doldurma etkisiyle temin edilmeye çalışılmasına dayandırılabilir. Diğer taraftan HKG deney yönteminin beton elektriksel direncinden yola çıkarak klorür geçirimsizliğini belirlemesi nedeniyle, beton içerisindeki iyon konsantrasyonu deney sonuçlarını

önemli ölçüde etkilemektedir (Scanlon ve Sherman, 1996). Hatta bazı çalışmalarda (Feldman ve diğ., 1994) elektrik akımını mutlaka klorür iyonlarının taşınmasına gerek kalmadığı, farklı çözeltilerle de benzer sonuçlar elde edildiği saptanmıştır. Bu noktadan yola çıkarak 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren ve 90 gün boyunca havada saklanan betonlardan 0.45 S/B oranına sahip, SD içermeyen numunelerle 0.60 S/B oranına sahip numunelerin aynı miktarda akım geçirmesi için toplam bağlayıcının %13'ü oranında SD gerekliken aynı kriterler suda saklanan numunelere uygulandığında %2.3 silis dumanının yeterli olduğu görülmüştür. Bu durum, özellikle silis dumanı olmak üzere genelde tüm puzolanların uygun şekilde kürlenmesi halinde beton elektriksel direncini büyük oranda düşürerek HKG deney sonuçlarını azalttığını göstermektedir. Yetersiz kür koşullarında puzolanik reaksiyon da tamamlanmadığından, hidratasyon sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 bileşikleri bağlanmayacak ve serbest OH^- iyonlarının fazlalığı nedeniyle beton elektriksel direncinde yukarıda sözü edilen fark görülmeyecektir. Havada tutulan betonlarda belirlenen %13 civarındaki SD/B oranı, büyük oranda silis dumanının doldurma etkisi sonucunda sağladığı faydanın göstergesidir.



Şekil 7.6: İki kür koşulunda 0.53 S/B oranına sahip silis dumanı katkılı betonların SD/B ve bağlayıcı miktarının klorür geçirimliliğine etkisi

Ortalama bir S/B oranında (0.53) toplam bağlayıcı miktarı ve SD/B oranının HKG deney sonuçları üzerine etkisini gösteren tepki yüzeyi şekil 7.6'da verilmiştir. Burada, şekil 7.5 için söylenenlere benzer şekilde SD/B oranının deney sonuçları üzerinde en fazla etkili olan parametre olduğu ve su küründe optimum SD/B oranının

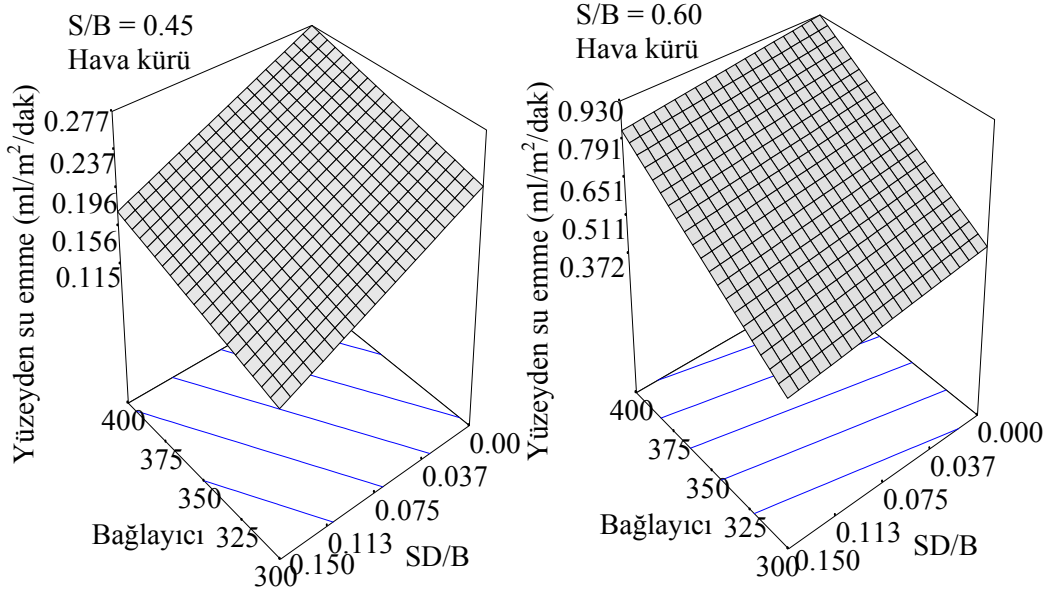
%11.6 bulunduğu söylenebilir. Buna ek olarak, geçen akım miktarının, suda saklanan numunelerde bağlayıcı dozajının 300 kg/m^3 'ten 400 kg/m^3 'e doğru arttırıldıkça düşük bir eğimle doğrusal olarak artış gösterdiği, havada tutulanlarda ise geçirimsizliğin 375 kg/m^3 'ten sonra değişmediği görülmektedir.

7.1.5 Yüzeiden Su Emme (ISAT) Deneyi

BS 1881 bölüm 5 (1970) standardına uygun şekilde gerçekleştirilen 10., 30., 60. ve 120. dakikalardaki ölçümlerden, beton özelliklerini en yalın haliyle yansıttığı düşünülen ilk ölçümlerin ortalamaları değerlendirilmeye alınmıştır (Tablo 7.2, 7.4, 7.12 ve 7.14). Diğer deney sonuçlarına benzer şekilde en yüksek geçirimsizlik hızları en yüksek S/B oranı ve en yüksek bağlayıcı miktarlarının seçildiği karışımlar için bulunmuştur. Şekil 7.7'de, iki uç S/B oranı (0.45 ve 0.60) ile üretilen ve 90 gün boyunca açık havada saklanan betonların su emme hızlarının bağlayıcı miktarı ve SD/B oranı ile değişimi gösterilmiştir. Yüksek dayanımlı (düşük S/B oranlı) betonlarda bağlayıcı miktarının %15'i kadar SD kullanıldığında aynı S/B oranına sahip yalın betonlara kıyasla su emme hızları bağlayıcı miktarına bağlı olarak %38-48 arasındaki oranlarda azalırken daha düşük dayanımlı betonlarda aynı oranda SD yerdeğiştirmesi ile söz konusu azalma %11-22 düzeyine düşmüştür. Silis dumanı etkinliğinin S/B oranının azalmasıyla arttığı ve buna bağlı olarak optimum karışım oranlarının da azaldığı başka araştırmacılar tarafından da saptanmıştır (Rao, 2001) (Persson, 1998) (Babu ve Prakash, 1995).

Toplam bağlayıcı miktarının artışında ise tersi bir etki görülmüştür. Toplam bağlayıcı miktarı, S/B oranı 0.60 olan betonlarda belirgin derecede daha anlamlı bulunmuştur (Şekil 7.7). Yüksek S/B oranı ile üretildikten sonra uygun şekilde kür uygulanmayan betonların boşluk yapısının sürekli ve boşluk miktarının yüksek olacağı kolayca tahmin edilebilir. Bağlayıcı hidratasyonunun yetersiz kalmasından kaynaklanan bu durumda mümkün olabilecek en geçirimsiz beton ancak toplam bağlayıcı miktarı azaltılarak ve agrega miktarı artırılarak üretilir. Bu çalışmada da bağlayıcı dozajının 400 kg/m^3 'ten 300 kg/m^3 'e düşürülmesi 0.60 S/B'lı betonların su emme hızlarında en az 2 kat azalmaya neden olurken S/B oranı 0.45'e indirildiğinde, daha az bağlayıcı kullanmanın olumlu etkisi kaybolmamış ancak sadece (SD/B oranına bağlı olarak) %20-33 düzeyinde azalma sağlamıştır. Burada incelenen S/B oranı aralığında elde edilen beton içindeki harç fazının, su kürü uygulanması halinde bile,

agregadan daha boşluklu ve geçirimli olması gerektiğinden dolayı, ülkemizdeki yaygın düşüncenin aksine, artan bağlayıcı dozajının olumsuz etkisi literatürde karşılaşılan birçok çalışmada da belirtildiği gibi (Dhir ve diğ., 1996) (Richardson ve diğ., 1999) (Dhir ve diğ., 2000) normal karşılanmalıdır.



Şekil 7.7: Havada saklanan, 0.45 ve 0.60 S/B oranlarına sahip silis dumanı katkılı betonların SD/B ve bağlayıcı miktarının yüzeyden su emme hızına etkisi

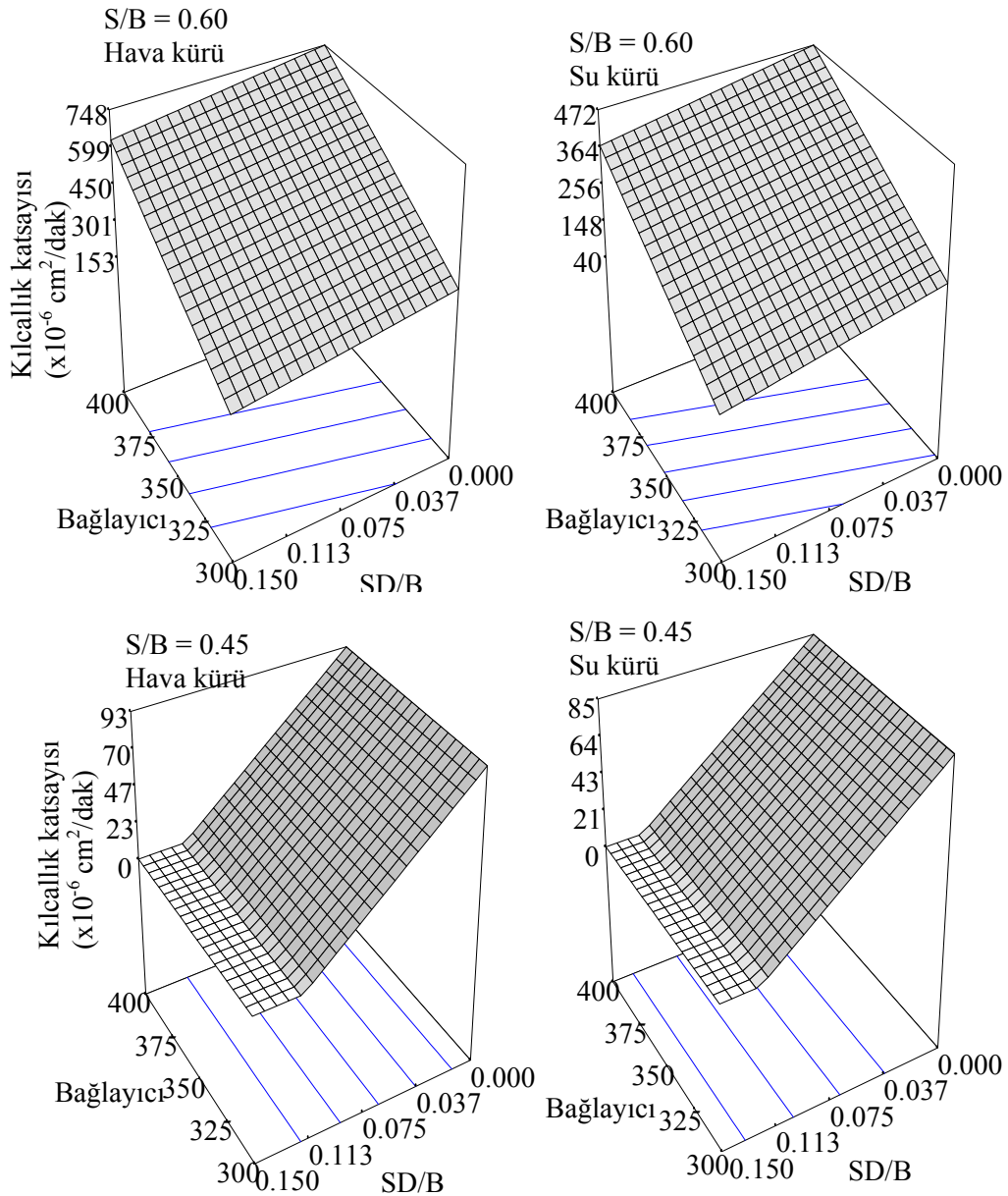
7.1.6 Kılcal Su Emme Deneyi

İncelenen S/B oranı aralığının sınır değerleri için (0.45 ve 0.60), varyans analizi sonucunda elde edilen modeller kullanılarak çizilen kılcallık katsayısı tepki yüzeyleri Şekil 7.8’de görülmektedir. Literatürde çeşitlilik gösteren kılcallık katsayısı birimi seçiminde etkinliklerin daha belirgin olması amacıyla katsayıların karekökü alınmamıştır.

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi, kılcallık katsayısının sabit S/B oranında iken bağlayıcı miktarı ve SD/B oranı ile değişimini gösteren yüzeylerin formu kür koşullarından etkilenmemiş ancak su kürü uygulanan betonlarda değerler bir miktar aşağıya doğru (kılcallık katsayısını azaltıcı yönde) ötelemiştir.

Bunun yanında, S/B oranındaki değişimler kılcallık katsayısı üzerinde etkin olan bileşim parametrelerinin etkinlik derecelerini önemli ölçüde değiştirmiştir. Yüksek S/B ile üretilen betonlarda SD/B oranının etkisi toplam bağlayıcı oranınıninkine nazaran oldukça düşük düzeyde iken S/B oranının düşmesiyle beton içerisindeki silis

dumanı artışı kılcal su emme miktarını büyük oranda azaltmaya başlamış ve 0.45 seviyesinde kılcallık katsayısını belirleyen en önemli parametre haline getirmiştir. Yüksek S/B oranlı betonlar zaten boşluklu olduğundan, bağlayıcının bir miktarının SD olması kılcal boşluk miktarı üzerinde önemli bir fark oluşturmamaktadır. Ancak düşük S/B oranlarında az olan boşlukların kılcal boyutta olanları SD tarafından doldurulmakta, agrega – çimento arayüzeyi hem doldurma hem de puzolanik etkileriyle yoğun bir yapıya sahip olmakta, bu da geçirimsizliği azaltmaktadır.



Şekil 7.8: İki kür koşulunda 0.45 ve 0.60 S/B oranlarına sahip silis dumanı katkıli betonların SD/B ve bağlayıcı miktarının kılcallığa etkisi

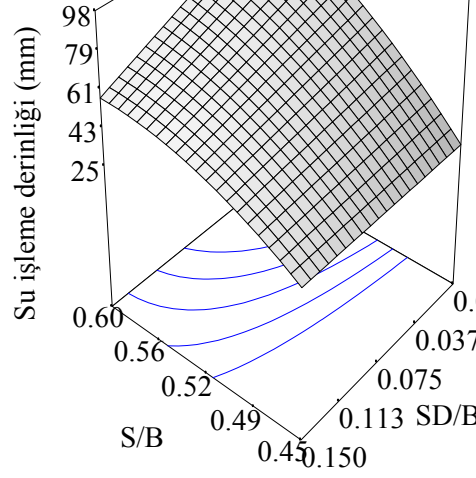
Yukarıda da anlatıldığı gibi beton içerisindeki hamur fazın geçirimsizliğinin agregadan daha yüksek olduğu düşünüldüğünde özellikle yüksek S/B oranlarında artan bağlayıcı miktarı beton özelliklerini daima olumsuz yönde etkilemiştir. Beton performansı yükseldikçe hamur fazın özellikleri agregaya yaklaştığı için bağlayıcı dozajının etkisi azalmış, burada seçilen S/B oranı alt sınırında (0.45) yok olmuştur. Yüzeyle su emme deneyinde su emme doğrultusunun kılcallıktan farklı olarak yerçekimi ile aynı olması nedeniyle hem boşlukların kılcal boyutta olması gerekliliği ortadan kalkmakta hem de bu boşlukların süreksizliğinden kılcal su emme kadar etkilenilmemektedir. Bundan dolayı YSE deneyinde 0.45 S/B oranında kaybolmayan bağlayıcı dozajı etkisi kılcal su emme deneyinde kaybolmuş ve kontrolü SD/B oranına bırakmıştır.

7.1.7 Basınçlı Geçirimsizlik Deneyi

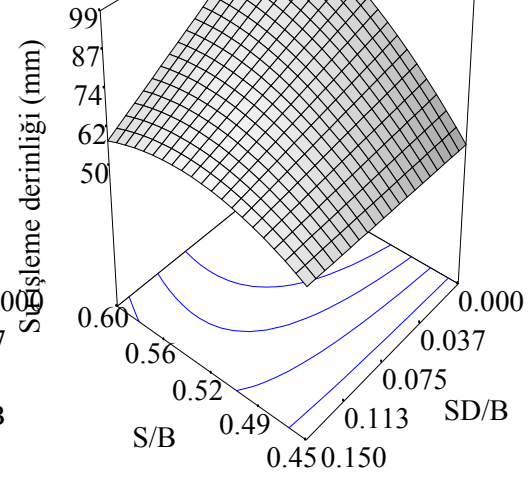
Havada saklanan betonlarda en yüksek su işleme derinlikleri 0.60 S/B oranı ile üretilen yalın betonlarda (puzolan içermeyen) elde edilmiştir (Şekil 7.9). Yine aynı koşulda kür edilen ve aynı S/B oranlı (0.60) betonlarda SD/B oranının 0'dan 0.15'e artışı toplam boşluk miktarını azalttığı için su işleme derinliğini toplam bağlayıcı miktarından bağımsız olarak %40'ın üzerinde düşürmüştür. Düşük S/B oranlı betonlarda ise SD artışı su işleme derinliğini değiştirmemiştir (Şekil 7.9). Öte yandan düşük S/B oranlarında toplam bağlayıcı dozajının 400 kg/m^3 'ten 300 kg/m^3 'e düşmesi su işleme derinliğini önemli ölçüde azaltmıştır.

Toplam bağlayıcı miktarı ve S/B oranının etkisinden bağımsız olarak, 90 gün boyunca su içerisinde saklanan herhangi bir yalın betonun çimentosunun %15'i SD ile ikame edildiğinde basınç altında su işleme derinliklerinin 17-18 mm azaldığı saptanmıştır. Şekil 7.9'da alt sırada görülen bu betonlara ait grafiklerin ölçek farkından dolayı bağlayıcı miktarının artışıyla SD/B oranının etkisi artmış gibi görünse de aslında yüksek dozlarda etkisi azalan parametre S/B oranıdır. Yine hava kürlü betonlara benzer olarak, düşük S/B oranlı betonlarda 300 kg/m^3 dozajlı betonların geçirimsizliği 400 kg/m^3 dozajlılara göre büyük miktarda azalmıştır.

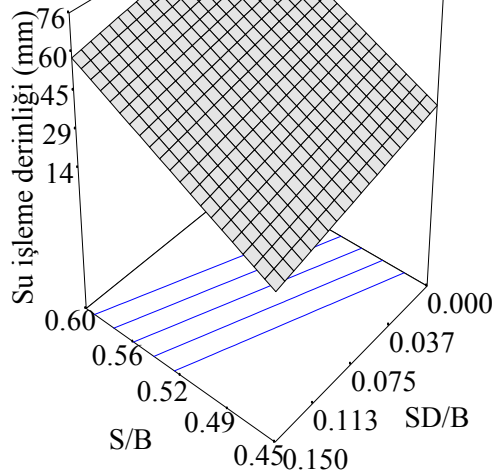
Bağlayıcı = 300 kg/m³
Hava kürü



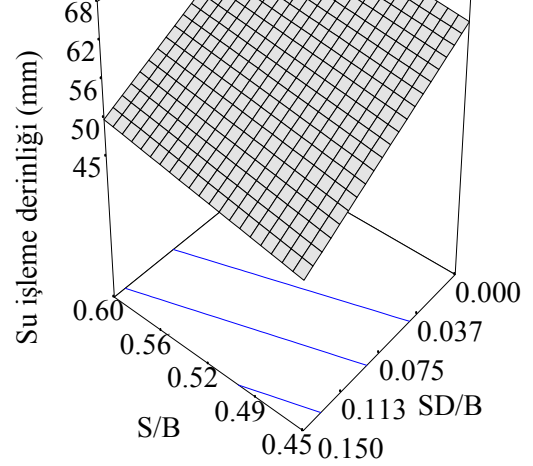
Bağlayıcı = 400 kg/m³
Hava kürü



Bağlayıcı = 300 kg/m³
Su kürü



Bağlayıcı = 400 kg/m³
Su kürü



Şekil 7.9: İki kür koşulunda 300 ve 400 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip silis dumani katkılı betonların SD/B ve S/B oranının su işleme derinliğine etkisi

7.2 Uçucu Kül İçeren Karışımlar

Puzolan olarak uçucu kül içeren ve havada saklanan beton karışımlarına ait bileşim parametreleri ve deney sonuçları Tablo 7.11 (toplam boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirirmliliği) ve 7.12'de (yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı geçirirmlilik), su kürü uygulanan beton karışımlarına ait benzer deney sonuçları ise Tablo 7.13 ve 7.14'te verilmiştir.

Tablo 7.11: Havada saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait bileşim, boşluk oranı (porozite), 90 günlük basınç dayanımı ve HKG deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>UK/B</i>	<i>Porozite (%)</i>	<i>B. dayanımı (MPa)</i>	<i>HKG (Coulomb)</i>
1	300	0.46	0.40	15.0	56.2	1133
2	350	0.53	0.25	16.7	46.9	2874
3	350	0.53	0.25	16.7	47.7	2637
4	350	0.53	0.25	16.7	46.7	2346
5	266	0.53	0.25	13.8	51.8	2448
6	434	0.53	0.25	16.5	55.5	1612
7	300	0.60	0.10	18.3	43.3	3567
8	400	0.60	0.40	22.2	39.6	4869
9	300	0.46	0.10	13.1	57.3	959
10	300	0.60	0.40	21.2	40.9	4251
11	400	0.46	0.10	15.0	54.2	2719
12	350	0.65	0.25	19.9	43	5122
13	350	0.53	0.25	17.6	50.1	2327
14	400	0.46	0.40	20.8	50.2	1421
15	350	0.41	0.25	13.0	62.2	693
16	350	0.53	0.25	17.6	51	2829
17	350	0.53	0.25	17.6	51.1	2651
18	350	0.53	0.00	15.0	50.1	4271
19	350	0.53	0.50	23.7	41.5	3877
20	400	0.60	0.10	21.4	50.2	4663

HKG: Hızlı klorür geçirimliliği ASTM C 1202

Uçucu küllü betonlarda su kürünün etkisini görmek için Tablo 7.11 ile Tablo 7.13'ün karşılaştırılması gerekmektedir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında açıkta saklanan numunelerin boşluk oranlarının, 90 gün süresince suda saklanan numunelere kıyasla %10 – %43 oranında arttığı, 90 günlük basınç dayanımlarının %2,0 – %14,4 oranında azaldığı, hızlı klorür geçirimliliklerinin ise 1,5 – 15 kat yükseldiği anlaşılmaktadır. Uçucu külün reaktivitesinin silis dumanına göre daha düşük olması nedeniyle, sağladığı fayda büyük oranda ileri yaşlarda gerçekleşen puzolanik reaksiyonla ortaya çıkmaktadır. Puzolanik reaksiyonun da ortamın nemine son derece duyarlı olmasından dolayı suda saklanan numunelerle açıkta saklanan numuneler arasındaki farkların daha çok arttığı görülmüştür. Özellikle HKG deneyinde, iki farklı kür koşulunda saklanan ve bağlayıcı miktarının yarısını uçucu külün oluşturduğu betonlarda bu fark 15 kata kadar çıkabilmektedir.

Tablo 7.12: Havada saklanan UK katkıli beton karışımlarına ait bileşim, yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı su geçirimsizliği deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>UK/B</i>	<i>ISAT (ml/m²/dak)</i>	<i>Kılcallık k. (x10⁻⁶cm²/dak)</i>	<i>Geçirimsizlik (mm)</i>
1	300	0.46	0.40	0.172	48	28
2	350	0.53	0.25	0.341	168	39
3	350	0.53	0.25	0.362	162	38
4	350	0.53	0.25	0.352	167	36
5	266	0.53	0.25	0.211	99	26
6	434	0.53	0.25	0.406	137	39
7	300	0.60	0.10	0.563	164	39
8	400	0.60	0.40	0.646	1121	67
9	300	0.46	0.10	0.221	50	34
10	300	0.60	0.40	0.599	590	63
11	400	0.46	0.10	0.283	106	26
12	350	0.65	0.25	0.604	527	80
13	350	0.53	0.25	0.333	158	38
14	400	0.46	0.40	0.323	152	34
15	350	0.41	0.25	0.138	20	15
16	350	0.53	0.25	0.343	158	39
17	350	0.53	0.25	0.355	159	39
18	350	0.53	0.00	0.479	185	46
19	350	0.53	0.50	0.651	319	50
20	400	0.60	0.10	0.693	433	39

ISAT: Yüzeyden su emme BS 1881: bölüm 5

Tablo 7.12 ve 7.14'te de aynı şekilde, sırasıyla, havada ve suda saklanan betonların yüzeyden su emme hızı, kılcal su emme katsayısı ve basınç altında su işleme derinliği değerleri gösterilmiştir. Havada saklanan numunelerde su kürü uygulanmışlara göre YSE (ISAT) değerlerinde 1.26 – 5.34 kat, kılcallık katsayısında 1.3 – 75 kat ve basınçlı su geçirimsizlik değerlerinde 1.1 – 2.13 kat arasında değişen oranlarda artışlar elde edilmiştir. Yüksek oranlardaki artışlar yüksek oranda uçucu kül içeren ve S/B oranı yüksek olan betonlarda görülmüştür. Sadece çimento kullanılan beton özelliklerinin kür koşullarına bağlı değişimi ise en düşük seviyede kalmıştır. Bu durum, uçucu külün uygun kür koşulları altında kılcal boşlukları doldurma yeteneğini ve puzolanlı betonların, puzolan içermeyen betonlara göre olumsuz kür koşullarından daha çok etkilendiğini, buna karşılık puzolansız betonların olumsuz koşullarını bir ölçüde tolere edebildiklerini göstermektedir (**Özer ve Özkul, 2004**).

Tablo 7.13: Suda saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait bileşim, boşluk oranı (porozite), 90 günlük basınç dayanımı ve HKG deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>UK/B</i>	<i>Porozite (%)</i>	<i>B. dayanımı (MPa)</i>	<i>HKG (Coulomb)</i>
1	300	0.46	0.40	11.2	58.0	207
2	350	0.53	0.25	12.5	50.2	527
3	350	0.53	0.25	12.5	51.2	456
4	350	0.53	0.25	12.5	53.4	527
5	266	0.53	0.25	12.3	53.5	554
6	434	0.53	0.25	13.9	58.6	460
7	300	0.60	0.10	15.9	45.9	1103
8	400	0.60	0.40	20.3	42.8	622
9	300	0.46	0.10	10.2	59.5	662
10	300	0.60	0.40	17.1	45.6	406
11	400	0.46	0.10	10.7	63.3	985
12	350	0.65	0.25	16.5	47.7	709
13	350	0.53	0.25	12.9	53.7	480
14	400	0.46	0.40	16.9	52.3	229
15	350	0.41	0.25	9.1	63.5	260
16	350	0.53	0.25	12.9	57.2	500
17	350	0.53	0.25	12.9	56.5	507
18	350	0.53	0.00	12.4	51.8	2020
19	350	0.53	0.50	20.6	45.6	258
20	400	0.60	0.10	16.7	51.6	1316

HKG: Hızlı klorür geçirimliliği ASTM C 1202

Uçucu kül içermeyen betonun tüm özelliklerinin, kendisiyle aynı veya daha yüksek S/B oranına sahip birçok karışım özelliklerinden daha olumsuz olduğu görülmektedir. Açıkta saklanan numuneler için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, yalın betonun dayanım ve geçirimlilik açısından yapılan kalite sıralamasında suda kür edilmiş numuneler arasındaki yerine göre birkaç basamak yükseldiği belirlenmiştir.

Tablo 7.14: Suda saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait bileşim, yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık katsayısı ve basınçlı su geçirimsizliği deney sonuçları

	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Deney sonuçları</i>		
	<i>Bağlayıcı (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>UK/B</i>	<i>ISAT (ml/m²/dak)</i>	<i>Kılcallık k. (x10⁻⁶cm²/dak)</i>	<i>Geçirimsizlik (mm)</i>
1	300	0.46	0.40	0.121	15	18
2	350	0.53	0.25	0.182	52	29
3	350	0.53	0.25	0.142	52	26
4	350	0.53	0.25	0.163	51	28
5	266	0.53	0.25	0.099	20	21
6	434	0.53	0.25	0.273	79	29
7	300	0.60	0.10	0.354	106	32
8	400	0.60	0.40	0.388	227	36
9	300	0.46	0.10	0.133	17	26
10	300	0.60	0.40	0.266	158	40
11	400	0.46	0.10	0.199	81	18
12	350	0.65	0.25	0.411	216	39
13	350	0.53	0.25	0.214	54	25
14	400	0.46	0.40	0.164	43	20
15	350	0.41	0.25	0.107	9	10
16	350	0.53	0.25	0.190	53	27
17	350	0.53	0.25	0.203	53	28
18	350	0.53	0.00	0.380	133	39
19	350	0.53	0.50	0.227	60	35
20	400	0.60	0.10	0.458	252	33

ISAT: Yüzeyden su emme BS 1881: bölüm 5

7.2.1 İstatistiksel Değerlendirme

Uçucu kül katkılı betonlardan 90 gün boyunca laboratuvar ortamında açıkta bırakılan numunelerin varyans analizi sonuçları Tablo 7.15 ve 7.16'da, aynı süre boyunca su içinde saklanan numunelerin sonuçları ise Tablo 7.17 ve 7.18'de görülmektedir.

Varyans analizi sonuçlarına göre, laboratuvar ortamında açıkta saklanan betonların toplam bağlayıcı miktarları (x_1), boşluk oranı, yüzeyden su emme ve kılcallık katsayısı üzerinde tek başına ve doğrusal olarak etkili bulunmuştur. Aynı parametrenin ikinci derece hali basınç dayanımı üzerinde etkili olmuştur. Ayrıca, aynı parametrenin sadece S/B oranı ile etkileşim içinde basınç dayanımına etki ettiği görülmüştür. Su/bağlayıcı oranı (x_2) incelenen tüm beton özelliklerini seçilen diğer bileşim parametreleri arasında en yüksek oranda ($Prob>F < 0.0001$) doğrusal olarak etkilemiştir (ikinci derece etki gözlenmemiştir). Uçucu kül/bağlayıcı oranı (x_3) ise farklı beton özellikleri üzerinde değişik şekillerde anlamlı bulunmuştur. UK/B, toplam boşluk miktarı ve basınç dayanımını daha çok doğrusal ama aynı zamanda

ikinci dereceden, HKG ve YSE'yi sadece ikinci dereceden, kılcallık katsayısını ve basınçlı su geçirimsizliğini ise hem doğrusal hem de S/B oranı ile birlikte etkileşim halinde etkilediği belirlenmiştir.

Tablo 7.15: Açıkta saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve HGK deneylerinin varyans analizi sonuçları

<i>Değişken</i>	<i>Boşluk oranı</i> ($R^2=0.83$)		<i>Basınç Dayanımı</i> ($R^2=0.87$)		<i>HKG</i> ($R^2=0.84$)	
	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>
Model	23.55	< 0.0001	16.75	< 0.0001	34.87	< 0.0001
x_1	11.76	0.0037	0.12	0.7385	-	-
x_2	41.79	< 0.0001	91.78	< 0.0001	90.56	< 0.0001
x_3	29.84	< 0.0001	16.76	0.0018	0.21	0.6520
x_1^2	-	-	5.20	0.0435	-	-
x_2^2	-	-	2.64	0.1322	-	-
x_3^2	10.80	0.0050	6.84	0.0240	13.83	0.0019
$x_1 * x_2$	-	-	5.83	0.0343	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	3.33	0.0955	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-	-

Tablo 7.16: Açıkta saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık ve basınçlı su geçirimsizliği deneylerinin varyans analizi sonuçları

<i>Değişken</i>	<i>ISAT</i> ($R^2=0.94$)		<i>Kılcallık katsayısı</i> ($R^2=0.79$)		<i>Geçirimsizlik</i> ($R^2=0.76$)	
	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>	<i>F Değeri</i>	<i>Prob>F</i>
Model	71.53	< 0.0001	11.17	0.0002	20.70	< 0.0001
x_1	20.73	0.0004	5.55	0.0363	-	-
x_2	210.15	< 0.0001	41.67	< 0.0001	51.38	< 0.0001
x_3	2.92	0.1083	10.14	0.0079	4.97	0.0405
x_1^2	-	-	-	-	-	-
x_2^2	-	-	4.16	0.0639	-	-
x_3^2	52.31	< 0.0001	3.22	0.0980	-	-
$x_1 * x_2$	-	-	3.70	0.0783	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	10.35	0.0074	5.75	0.0291

Tablo 7.17: Suda saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve HKG deneylerinin varyans analizi sonuçları

Değişken	Boşluk oranı ($R^2=0.87$)		Basınç Dayanımı ($R^2=0.86$)		HKG ($R^2=0.92$)	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	26.71	< 0.0001	24.13	< 0.0001	70.29	< 0.0001
x_1	5.96	0.0285	1.39	0.2588	-	-
x_2	56.52	< 0.0001	82.22	< 0.0001	20.93	0.0003
x_3	31.67	< 0.0001	15.50	0.0015	144.36	< 0.0001
x_1^2	-	-	-	-	-	-
x_2^2	-	-	-	-	-	-
x_3^2	27.70	0.0001	13.18	0.0027	29.29	0.0008
$x_1 * x_2$	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	11.70	0.0041	8.36	0.0119	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-	-

Tablo 7.18: Suda saklanan UK katkılı beton karışımlarına ait yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık ve basınçlı su geçirimsizliği deneylerinin varyans analizi sonuçları

Değişken	ISAT ($R^2=0.94$)		Kılcallık katsayısı ($R^2=0.87$)		Geçirimsizlik ($R^2=0.83$)	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	62.85	< 0.0001	26.81	< 0.0001	31.82	< 0.0001
x_1	41.80	< 0.0001	17.62	0.0009	-	-
x_2	196.36	< 0.0001	93.36	< 0.0001	79.20	< 0.0001
x_3	22.68	0.0003	1.97	0.1825	0.020	0.8884
x_1^2	-	-	-	-	-	-
x_2^2	16.86	0.0011	14.25	0.0021	-	-
x_3^2	40.84	< 0.0001	8.71	0.0105	16.24	0.0010
$x_1 * x_2$	-	-	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-	-

Kalıplardan çıkarıldıktan sonra 90 gün süresince kirece doymun su içerisinde tutulan betonlarda (Tablo 7.17 ve 7.18), toplam bağlayıcı miktarının (x_1) boşluk oranı, HKG ve basınçlı geçirimsizlik deneyleri dışında kalan beton özellikleri üzerindeki doğrusal anlamlılıklarının bir miktar arttığı görülmüştür. Ayrıca boşluk oranı ve basınç dayanımı üzerinde UK/B oranı (x_3) ile birlikte ikili etkinliği ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan açıkta tutulan betonların basınç dayanımında etkin görünen x_1^2 , su kürü uygulandığında ortadan kaybolmuştur. Beton kalitesinde en belirleyici parametre olan S/B oranının doğrusal anlamlılığına – su kürü sayesinde – YSE ve kılcallık deneylerinde anlamlılık gösteren ikinci dereceden terimler de eklenmiştir. Ancak, basınç dayanımı üzerinde toplam bağlayıcı oranı ile birlikte ve kılcallık katsayısı üzerinde UK/B oranı ile birlikte görülen S/B oranının etkinliği su kürü

uygulanmasıyla ortadan kalkmış, hiçbir beton özelliğini ikili olarak etkilemez hale gelmiştir.

Uçucu kül/bağlayıcı (x_3) oranının etkisi ise silis dumanımında olduğu gibi diğer bileşim parametrelerine göre biraz daha karmaşık şekilde kendini göstermiştir. Açıkta bekleyen betonların boşluk oranı ve basınç dayanımı üzerinde anlamlı görünen doğrusal ve ikinci derece haline ek olarak, suda saklanan betonlarda UK/B oranı, toplam bağlayıcı miktarı ile birlikte ikili olarak da anlamlı hale gelmiştir. Ayrıca su kürü uygulanmadığında HKG ve YSE'yi sadece kuadratik olarak etkilerken, numuneler 90 gün süresince su içinde tutulduğunda (ikinci derece etkiye ek olarak) doğrusal olarak da etkilemeye başlamıştır. Bu durumun tersi kılcallık katsayısı ve basınçlı su geçirimsizliğinde ortaya çıkmıştır. Suda saklanan betonlarda UK/B oranının doğrusal anlamlılığı kaybolmuş, yine tek başına fakat ikinci derece haliyle anlamlılık kazanmıştır. Ayrıca kılcallık ve geçirimsizlik üzerinde (numunenin açıkta saklanması halinde) S/B ve UK/B oranlarının etkileşim içindeki anlamlılığı su kürüyle birlikte etkinliğini yitirmiştir.

Yukarıda anlatılan anlamlılık ve etkinliklerin doğrultularını (olumlu ya da olumsuz olup olmadıklarını) anlamak için Tablo 7.19 ve 7.20'de verilen model katsayılarının değerlik ve büyüklüklerinin değerlendirilmesi gerekir. Buna göre, toplam bağlayıcı oranındaki artışların açıkta saklanan betonların boşluk oranını arttırdığı, suda saklananlarda UK/B oranının 0.168'den fazla olması durumunda aynı yönde değiştirdiği, daha düşük oranlarda UK kullanıldığında ise azalttığı Şekil 7.10'da görülmektedir. Benzer şekilde, artan bağlayıcı miktarı, su kürü uygulanmayan numunelerin basınç dayanımını olumsuz yönde etkilerken su kürü uygulananlarda (Şekil 7.10) bağlayıcı içerisindeki uçucu kül miktarı %29.7'den düşük ise olumlu, bu seviyeden yüksek ise olumsuz yönde değiştirmektedir. Suda saklanan betonlarda toplam bağlayıcı miktarının %29.7 oranında uçucu kül içermesi halinde toplam bağlayıcı miktarının etkisinin kalkması, bu oranın istenilen dayanıma en düşük bağlayıcı oranıyla ulaşmak yani en ekonomik betonu üretmek için gerekli optimum seviye olduğunu göstermektedir. Harçların boşluk oranında bulunan kritik UK/B oranının 0.168 seviyesinden (Şekil 7.10) betonlarda basınç dayanımı için belirlenen kritik UK/B oranına, 0.297'ye ötelenmesi, harçlarda iri agrega-çimento arayüzeyinin bulunmamasından kaynaklanmış olabilir. Tablo 7.20'de verilen denklemler kullanılarak havada saklanan betonların S/B oranı 0.46'dan düşük olduğu zaman

artan bağlayıcı miktarının kılcallık katsayısını düşürdüğü, daha yüksek S/B oranlarında diğer sonuçlara benzer olarak olumsuz etki gösterdiği anlaşılmaktadır. Düşük S/B oranına sahip betonlarda artan bağlayıcı miktarının önce terlemeyi azaltıp devamında da kurumayı yavaşlatarak daha fazla beton karma suyunun hidrasyon ve puzolanik reaksiyonda kullanılmasını sağlaması bu durumun nedeni olarak kabul edilebilir.

Tablo 7.19: Her iki kür koşulu için UK katkılı beton karışımlarına ait boşluk oranı, 90 günlük basınç dayanımı ve HKG modellerinden elde edilen fonksiyon katsayıları

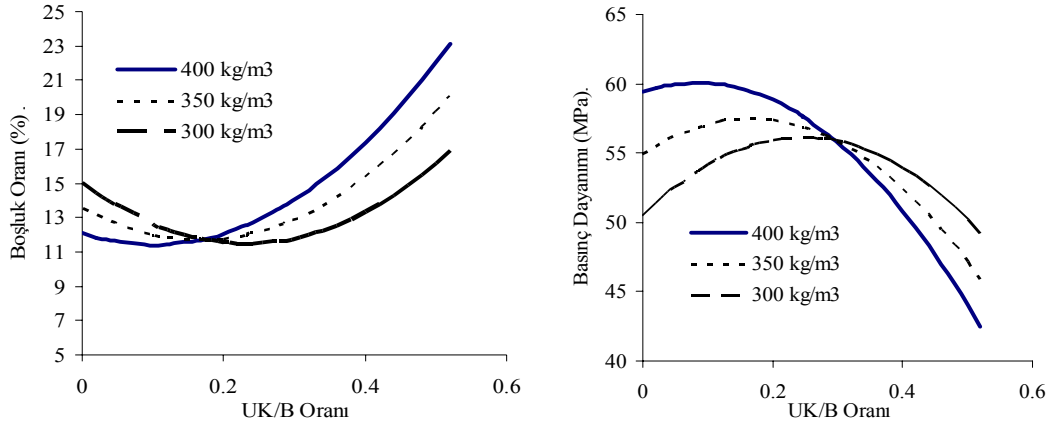
<i>Değişken</i>	<i>Boşluk oranı</i>		<i>Basınç Dayanımı</i>		<i>HKG</i>	
	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>
Sabit	-8.72	8.03	287.08	62.37	-6247	606
x_1	0.024	-0.03	-0.59	0.089	-	-
x_2	32.22	31.85	-462.85	-77.17	19422	2217
x_3	-11.88	-84.17	81.80	135.74	-11829	-7625
x_1^2	-	-	5.17×10^{-4}	-	-	-
x_2^2	-	-	188.12	-	-	-
x_3^2	49.17	66.91	-65.88	-92.74	22782	9816
$x_1 * x_2$	-	-	0.525	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	0.177	-0.185	-0.3	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-	-	-

Tablo 7.20: Her iki kür koşulu için UK katkılı beton karışımlarına ait yüzeyden su emme (ISAT), kılcallık ve basınçlı su geçirimsizliği modellerinden elde edilen fonksiyon katsayıları

<i>Değişken</i>	<i>ISAT</i>		<i>Kılcallık katsayısı</i>		<i>Geçirimsizlik</i>	
	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>	<i>Hava</i>	<i>Su</i>
Sabit	-1.096	0.908	7603	887	3.924	-24.37
x_1	1.05×10^{-3}	9.19×10^{-4}	-10.61	0.595	-	-
x_2	2.391	-4.693	-21854	-4627	55.5	112.7
x_3	-1.659	-1.204	-7304	-516.4	-285.8	-77.46
x_1^2	-	-	-	-	-	-
x_2^2	-	5.769	12833	5288	-	-
x_3^2	3.58	1.956	2457	900	-	153.2
$x_1 * x_2$	-	-	22.86	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	12738	-	595.2	-

Diğer iki bileşim parametresinden S/B oranının, bilindiği gibi, basınç dayanımı ile ters, incelenen diğer özelliklerle doğru orantılı olduğu, yani yükselmesiyle tüm özellikleri olumsuz yönde etkilediği saptanmıştır. Doğrusal terimin dışında, S/B (x_2) değişkeninin çeşitli hallerini (ikinci derece veya diğer değişkenlerle etkileşim içinde)

içeren ve farklı değerlere sahip terimlerin sonuç üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı, değerler denklem içindeki yerlerine konulduğunda görülmektedir.

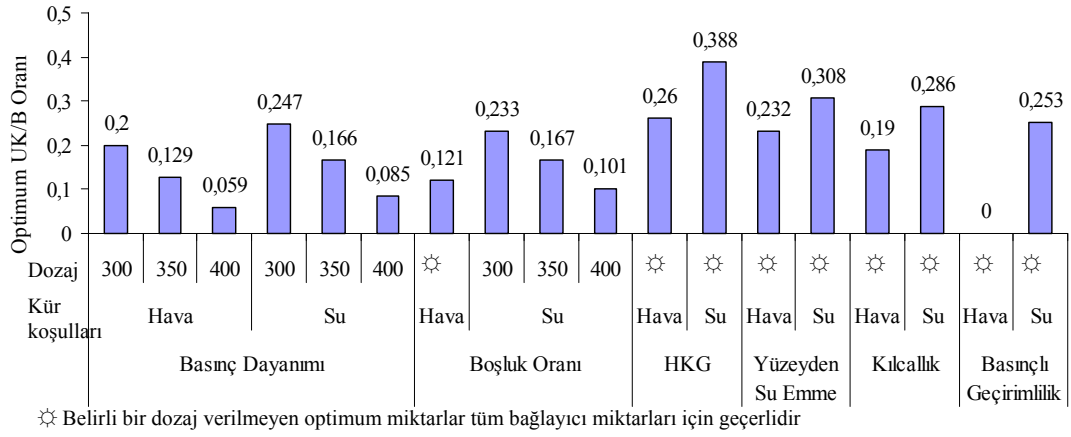


Şekil 7.10: Suda saklanan UK katkıli betonlarda boşluk oranı ve basınç dayanımının toplam bağlayıcı miktarı ve UK/B oranı ile ilişkisi (S/B = 0.50)

Çalışma kapsamında ölçülen tüm beton özellikleri için optimum uçucu kül yerdeğiştirme düzeyleri elde edilen modeller sayesinde belirlenmiştir. Havada saklanan betonların harç fazlarında ölçülen boşluk oranları UK/B oranı 0.121 seviyesine ulaşana kadar azalmış, bu seviyeden sonra boşluk oranında artışlar meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 7.11). Suda saklananlarda ise optimum UK/B oranı toplam bağlayıcı miktarına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. En düşük boşluk oranı, 300 kg/m³ bağlayıcı içeren betonlarda 0.233 UK/B oranı ile, 350 kg/m³ bağlayıcı içeren betonlarda 0.167, 400 kg/m³ bağlayıcı içeren betonlarda 0.101 UK/B oranı ile yakalanabilmiştir. Benzer şekilde en yüksek basınç dayanımı ise, havada tutulan ve suda saklanan betonlar için sırasıyla, 300 kg/m³ bağlayıcıda 0.200 ve 0.247 UK/B oranıyla, 350 kg/m³ bağlayıcıda 0.129 ve 0.166 UK/B oranıyla, 400 kg/m³ bağlayıcıda 0.059 ve 0.085 UK/B oranıyla elde edilmiştir. Su kürü uygulanan betonlarda boşluk oranı ve basınç dayanımı için birbirinden bağımsız şekilde belirlenen optimum UK/B oranlarının son derece uyumlu olduğu görülmektedir.

İncelenen UK/B aralıkları içinde (0 - %50) optimum UK yerdeğiştirme oranının havada tutulan ve suda saklanan betonlar için sırasıyla, HKG için 0.260 ve 0.388, YSE için 0.232 ve 0.308 olduğu yine Tablo 7.19 ve 7.20’de verilen modeller kullanılarak belirlenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı bu deneylerde optimum UK/B oranlarını değiştirmemiştir. En düşük kılcılık katsayılarını elde etmek için–

bağlayıcı miktarından bağımsız olarak – kür uygulanmayan betonlarda %19, kür uygulananlarda ise %28.6 oranında uçucu kül bulunması gerektiği hesaplanmıştır. Son olarak basınçlı su işleme derinliklerinin su kürü uygulanmaması durumunda artan UK/B oranıyla sürekli olarak arttığı, puzolanik reaksiyon için gerekli su sağlandığında 0.253 UK/B oranına kadar azaldığı, bu değere ulaştıktan sonra artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Belirlenen optimum UK/B oranları topluca Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



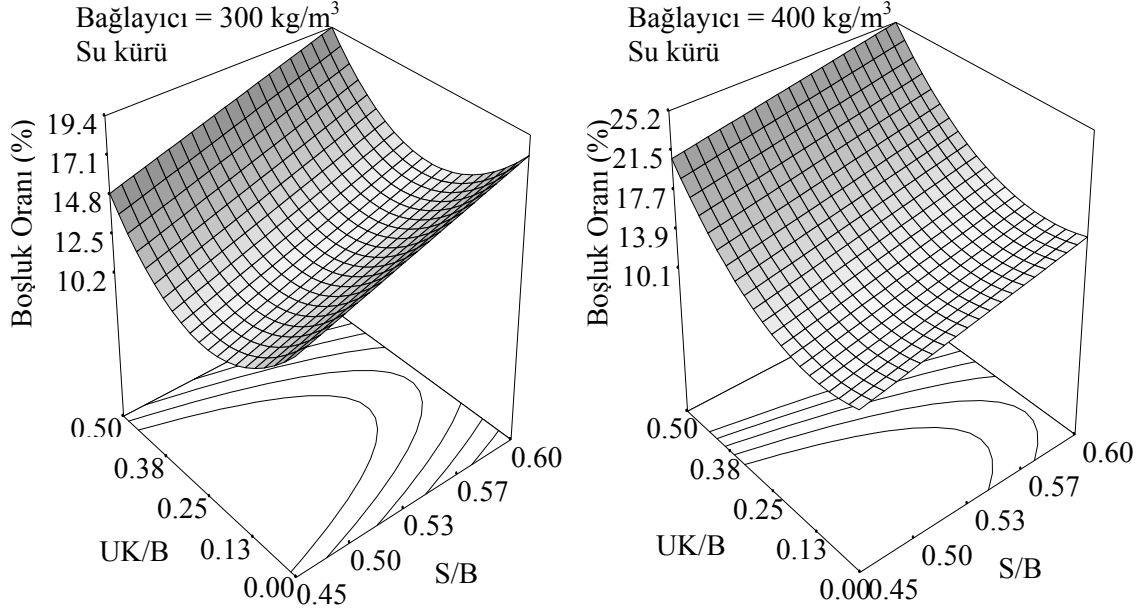
Şekil 7.11: Modellerden hesaplanan optimum UK/B oranları

7.2.2 Civalı Porozimetre Deneyi

Kalıplardan çıkarıldıktan sonra 90 gün boyunca su içerisinde kür uygulanmış 300 kg/m³ ve 400 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip betonlara ait boşluk oranı tepki yüzeyleri Şekil 7.12’de verilmiştir.

Tüm puzolanlardan beklenildiği gibi, uçucu küllü betonlar da uygun şekilde kür edildiğinde UK/B oranı etkinliği belirgin derecede artmıştır. Silis dumanı katkılı betonlara benzer şekilde, su kürü, puzolanı diğer bileşim parametreleriyle etkileşim içine sokmuş ve boşluk oranının UK/B ve S/B oranları ile değişiminin farklı bağlayıcı miktarlarında değişik karakterlerde bulunmasına neden olmuştur. Şekil 7.12’ye dikkat edildiğinde ilk göze çarpan noktanın, en düşük boşluk oranını elde etmek için gerekli optimum UK/B oranının toplam bağlayıcı miktarı arttıkça azalması olduğu söylenebilir. Şekil 7.11’deki grafikten de görülebileceği gibi, artan bağlayıcı miktarı en yüksek basınç dayanımı için gerekli optimum UK/B oranını da azaltmıştır. Özellikle arayüzeyin daha yoğun olarak bulunduğu betonlarda, agrega konsantrasyonu azalması sonucunda arayüzeyin iyileştirilmesi için gereken UK

miktardaki azalmaya atfedilebilen bu durum, harçlarda iri agrega bulunmaması nedeniyle sadece puzolanik reaksiyonu tamamlanmış su kürü uygulanan numunelerde görülmüştür.

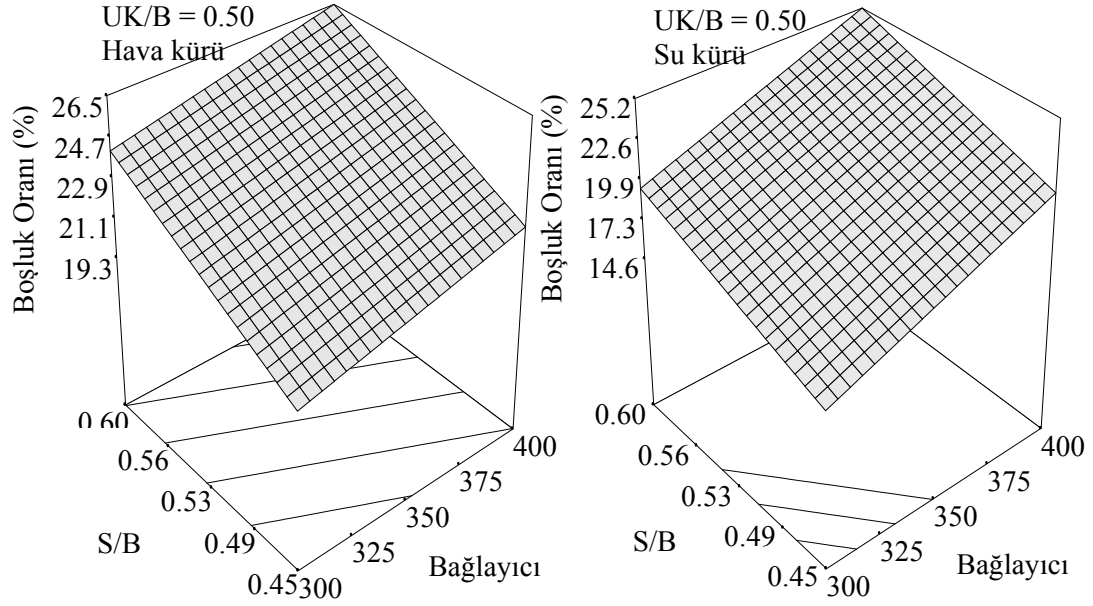


Şekil 7.12: 300 kg/m³ ve 400 kg/m³ bağlayıcı içeren, suda saklanan betonların boşluk oranı tepki yüzeyleri

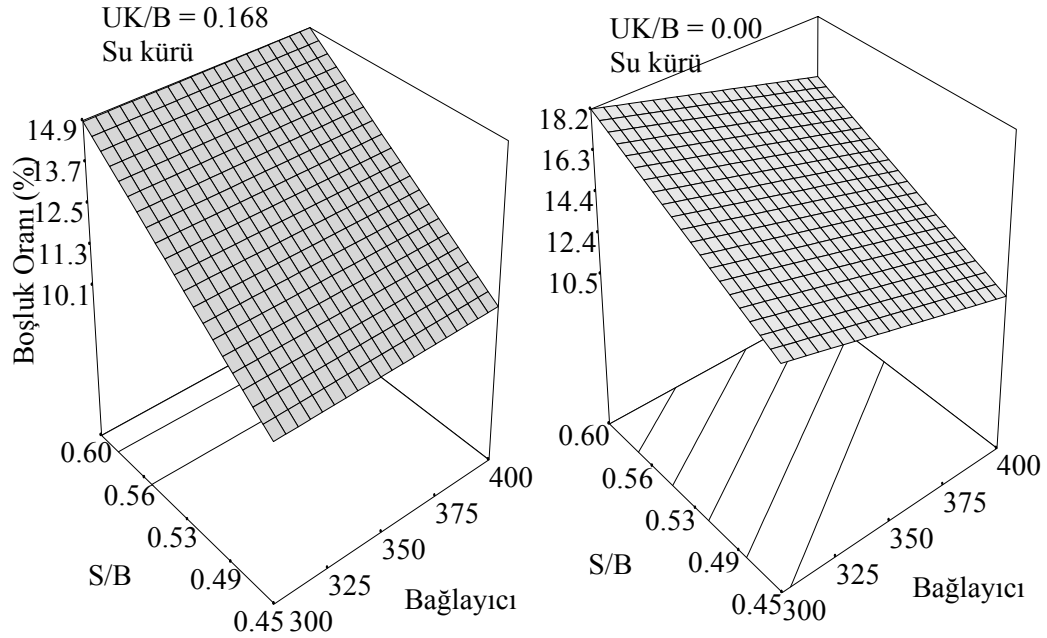
Bir diğer nokta ise bağlayıcı miktarının artmasıyla boşluk oranlarında görülen genel bir artış eğilimidir. En uygun UK/B oranını gösteren bölgeler dışında, Şekil 7.12’de verilen grafiklerin dikey eksenlerindeki değerler söz konusu eğilimi göstermektedir. Ayrıca S/B oranının 0.60’tan 0.45’e azalması sonucu boşluk oranında her iki dozaj için de %4.7 (boşluk oranı birimi olarak) civarındaki azalma görülmektedir, fakat yüksek bağlayıcı miktarlarında, ölçülen yüksek seviyedeki boşluk oranı değerleri sayesinde, S/B oranının belirtilen şekilde değişmesiyle boşluk oranı %18.7 azalırken düşük bağlayıcı miktarlarının boşluk oranları %24.7 azalarak düşük dozajlı karışımların S/B oranındaki değişimden daha fazla etkilendiği belirlenmiştir.

Kür koşullarının yüksek oranda UK içeren betonların boşluk oranı üzerine etkisi Şekil 7.13’te görülmektedir. Suda saklanan numunelerin boşluk oranı değerleri havada tutulanlarla karşılaştırıldığında yüksek bağlayıcı oranına sahip numunelerde yaklaşık %5–6 civarında bir artışın görüldüğü, bağlayıcı miktarı azaldıkça kür koşullarından etkilenmenin arttığı ve 300 kg/m³’e kadar düştüğünde hava kürü numunelerindeki boşluk oranı artışının (su kürüne göre) %24–32 seviyesine yükseldiği saptanmıştır. Beton karma suyunun hidrasyonda kullanılması su kürü

uygulanmayan betonlarda çok önemli olması nedeniyle, belirli bir S/B ile üretilen betonlardan yüksek bağlayıcı içeren karışımlar düşük bağlayıcılıklara göre avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, kür uygulamasının aksayabileceği durumlarda beton kalitesi açısından en az kaybın yüksek bağlayıcı miktarı kullanılmasıyla mümkün olacağı söylenebilir.



Şekil 7.13: UK/B oranı 0.50 olan beton boşluk oranlarının her iki kür koşulunda S/B oranı ve bağlayıcı miktarı ile değişimi



Şekil 7.14: Suda saklanan betonların 0 ve %16.8 UK/B oranları için elde edilen boşluk oranı tepki yüzeyleri

Şekil 7.13'te UK/B oranı %50 olan (en fazla UK içeren betonlar) ve havada veya suda tutulan betonların her iki kür koşulunda elde edilen tepki yüzeylerinin aynı

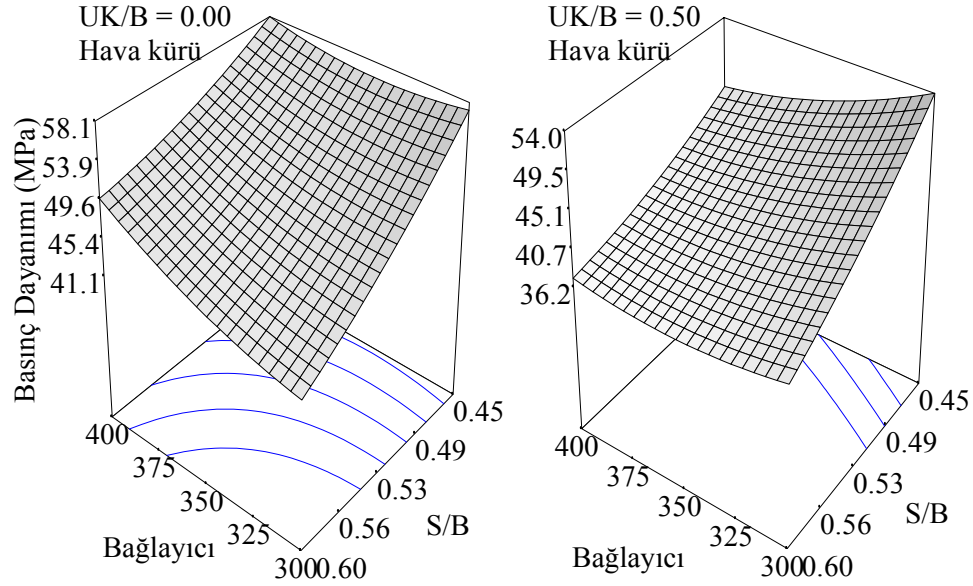
karakterde olduğu görülmüştür. Yani, en yüksek boşluk oranı her zaman 400 kg/m^3 bağlayıcı kullanılan betonlara ait çıkmış, bağlayıcı azaldıkça boşluk miktarı da azalmıştır. Suda saklananlarda ise yüksek oranda UK kullanıldığında kaçınılmaz olan hidrate olmamış UK miktarı artan bağlayıcı miktarıyla artacağından, benzer bir davranış göstermiştir. Uçucu kül/bağlayıcı oranının azalmasıyla yüksek bağlayıcı miktarının olumsuz etkisi 0.168 UK/B seviyesine kadar yavaş yavaş azalmış (Şekil 7.10) ve bu seviyede bağlayıcı miktarının etkisi kaybolmuştur (Şekil 7.14). Beton içerisindeki UK miktarının daha da azalmasıyla 400 kg/m^3 bağlayıcı karışımlar 300 kg/m^3 bağlayıcı içerenlere göre daha boşluksuz hale gelmiştir. Aslında, Şekil 7.10'da verilen grafiğe dayanarak değerlendirildiğinde daha az miktarda bağlayıcı içeren yalın betonlarda daha fazla agrega ve dolayısıyla daha fazla agrega-çimento arayüzeyi bulunması nedeniyle boşluk miktarının yüksek olması olağan bir durumdur. Yine aynı nedenden dolayı 300 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonlarda, 400 kg/m^3 bağlayıcı içerenlere göre, daha yüksek UK/B seviyelerine kadar boşluk miktarında azalmalar görülmüştür. Böylece yukarıda belirtilen %16.8'den daha fazla UK ve düşük bağlayıcı içeren betonlarda daha boşluksuz bir yapı meydana gelmiş, boşluk oranındaki azalma 400 , 350 ve 300 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonlarda, sırasıyla, %8.5, %16.6 ve %24.7 UK yerdeğiştirme düzeyine kadar devam etmiştir.

7.2.3 Basınç Dayanımı Deneyi

Uçucu kül katkılı betonlarda uygun kür koşullarının sağlanamaması durumunda UK/B oranının 90 günlük basınç dayanımı üzerine etkisi Şekil 7.15'te sunulmuştur.

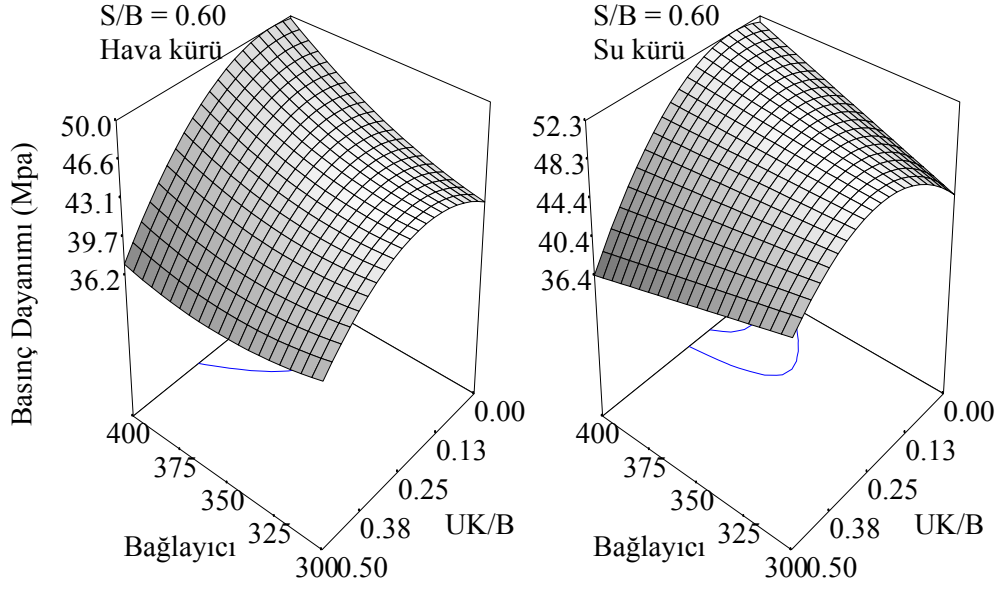
Hem yalın betonda hem de yüksek oranda UK içeren betonda 400 kg/m^3 bağlayıcı kullanılması durumunda, S/B oranında gerçekleşecek birim değişimin basınç dayanımı üzerinde 300 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonlar kadar etkili olmadığı Şekil 7.15'te görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının 0.60 'tan 0.45 'e düşürülmesiyle 400 kg/m^3 bağlayıcı içerenlerin basınç dayanımları %16–19, 300 kg/m^3 bağlayıcı içerenlerin basınç dayanımları ise %37–39 oranında yükselmiştir. Yüksek S/B oranlı yalın betonlarda çimento dozajının artması ile azalan arayüzey miktarı dayanımın da artmasına yol açmaktadır. Ancak, aynı betonlarda S/B oranı düştüğünde arayüzeyin kalitesi de yükseldiği için arayüzey miktarı dayanım üzerinde etki yapmamaktadır. Öte yandan, düşük bağlayıcı miktarında S/B oranı dayanım üzerinde yüksek dozajlı betonlara göre daha etkilidir. Düşük bağlayıcı dozajlı betonlarda toplam arayüzeyin

daha fazla olması nedeniyle; S/B oranının iyileşmesi dayanımı daha fazla arttırırken, yüksek S/B oranlı betonlarda göreceli olarak daha az miktardaki arayüzeyin iyileşmesi dayanım üzerinde daha az etkili olmaktadır. Düşük S/B oranı ile üretim yapıldığında bu etki Şekil 7.15'teki yalın betonlarda görüldüğü gibi kaybolabilmektedir. Ancak, toplam bağlayıcının yarısı UK'dan meydana geliyorsa, hidrate olmamış UK miktarının en az olduğu durum, yani en düşük bağlayıcı miktarı ile üretim yapmak basınç dayanımı açısından en uygun çözüm olacaktır.

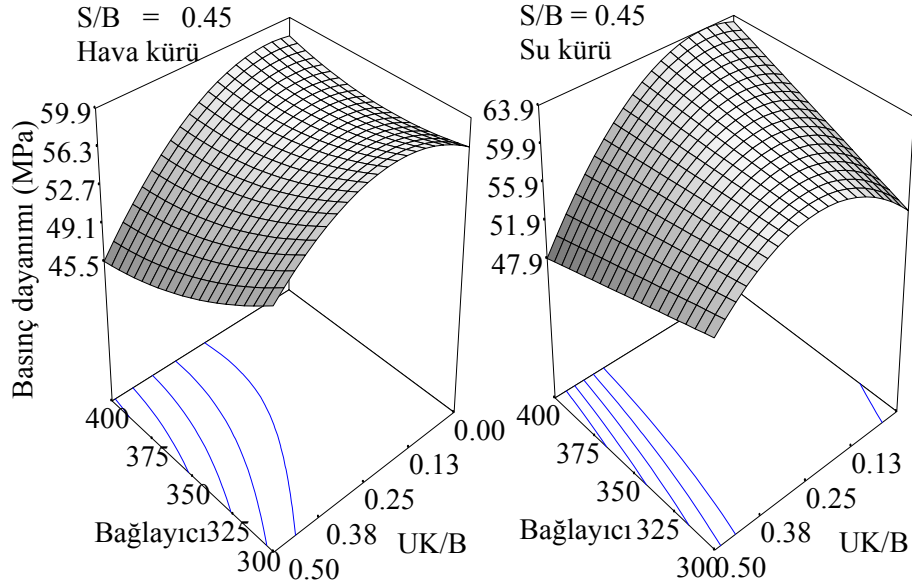


Şekil 7.15: Açıkta tutulan betonların 0 ve %50 UK/B oranları için elde edilen basınç dayanımı tepki yüzeyleri

Su/bağlayıcı oranı 0.60 olan betonların basınç dayanımlarının toplam bağlayıcı miktarı ve UK/B oranı ile ilişkisinin esas karakteri kür koşullarından etkilenmemektedir (Şekil 7.16). Suda saklanan betonlarda beklenildiği gibi dayanımın daha yüksek değerlerine doğru bir miktar ötelenme söz konusudur. Her iki kür koşulunda da, Şekil 7.11'de gösterildiği gibi, optimum UK/B oranları azalan bağlayıcı miktarıyla artmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.45'e düşürüldüğünde suda saklanan numunelerde sadece yüksek basınç dayanım değerlerine doğru bir ötelenme görülmüş, havada saklananlarda ise yüksek S/B oranlı betonlarda görülen dayanımın artan bağlayıcı miktarı ile azalış eğilimi tersine dönmüş ve bir miktar artış gözlenmiştir (Şekil 7.17).



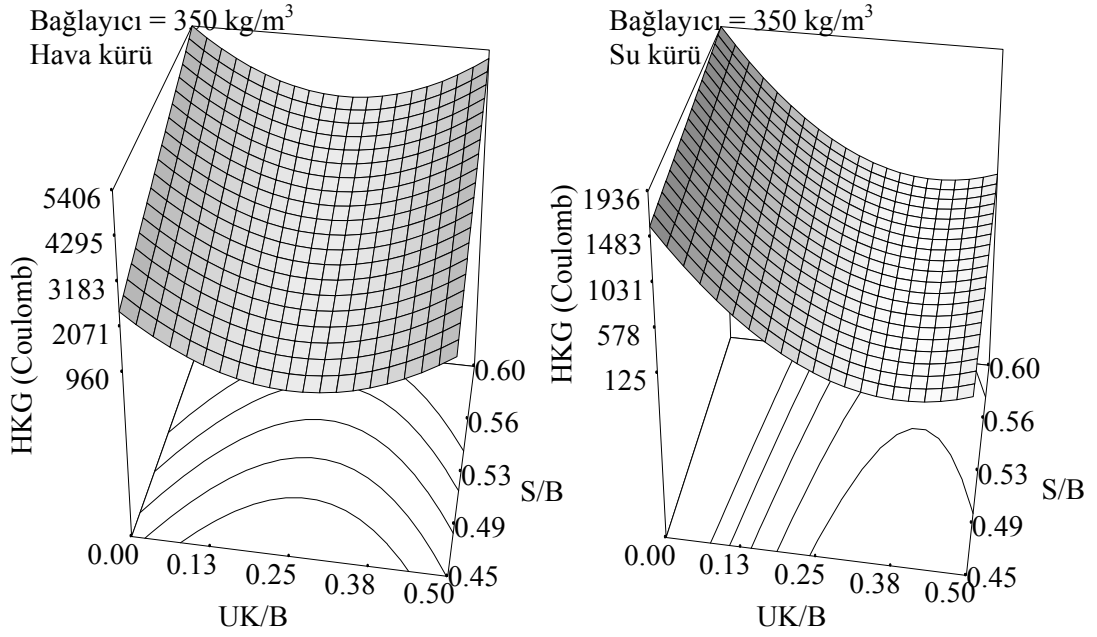
Şekil 7.16: 0.60 S/B oranı ile üretilen ve iki farklı kür koşulunda tutulan betonların basınç dayanımı tepki yüzeyleri



Şekil 7.17: 0.45 S/B oranı ile üretilen ve iki farklı kür koşulunda tutulan betonların basınç dayanımı tepki yüzeyleri

7.2.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi

Tablo 7.11 ve 7.13'te verilen deney sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda elde edilen modeller (Tablo 7.19), Şekil 7.18'de görülen, 350 kg/m³ bağlayıcı içeren betonların HKG deney sonuçları üzerinde kür koşullarının etkisini gösteren grafiklerin çizilmesini sağlamıştır.

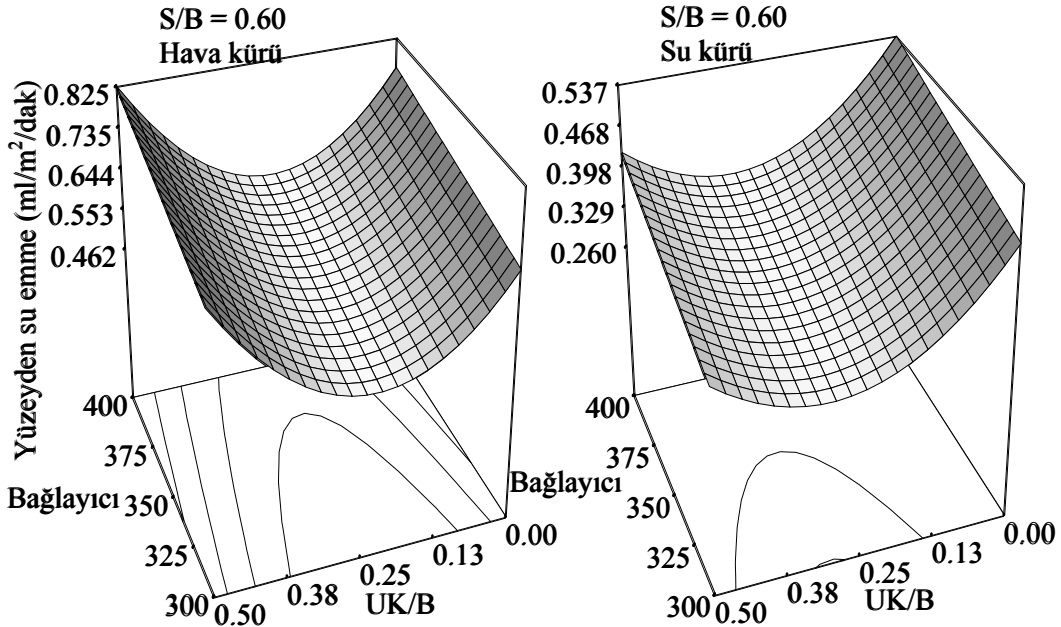


Şekil 7.18: İki kür koşulunda 350 kg/m^3 bağlayıcı içeren uçucu kül katkılı betonların UK/B ve S/B oranlarının klorür geçirimsizliğine etkisi

Havada tutulan betonlarda S/B oranı, 0.60'tan 0.45'e düşürüldüğünde toplam geçen akım miktarını 3000 Coulomb düşürecek kadar etkili bir bileşen iken, suda saklanan betonlarda sadece 300 – 400 Coulomb düşüş gerçekleştirilmiştir. Beton içindeki UK miktarının etkisi ise S/B oranının etkisinin tersi şekilde kür koşullarından etkilenmiştir. Yani UK'nin etkinliği suda saklanan betonlarda yüksek, havada saklananlarda düşük bulunmuştur. Su kürü uygulanmayan yalın betonların çimentosu UK ile yer değiştirilmeye başladığında toplam geçen akım miktarları düşmeye başlamış, UK/B oranı 0.26'ya ulaştığında yaklaşık 1500 Coulomb civarında bir azalma meydana getirerek minimum değere ulaşmıştır (S/B oranından bağımsız olarak). Bu noktadan sonra artan UK/B oranı klorür geçirimsizliğini olumsuz yönde etkilemeye başlamıştır. Suda kür edilen betonlarda aynı işlem tekrarlandığında minimum Coulomb değerine UK/B oranı 0.388'e vardığında ulaşılabilmiştir; yani optimum UK miktarı su kürü ile yüksek bir değere ötelenmiştir. Havada tutulan betonlara benzer şekilde yalın betonla minimum klorür geçirimsizliğine sahip beton arasında da 1500 Coulomb fark görülmüştür. Ancak, suda saklanan yalın betonların toplam geçen akım değerinin 2000 Coulomb'un altında olduğu unutulmamalıdır.

7.2.5 YüzeYden Su Emme Deneyi

YüzeYden su emme deneyi sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen varyans analizine göre değişkenlerin hiçbirinde etkileşim görülmemiştir. Bundan dolayı elde edilen tepki yüzeyi karakteri değişmemiş, değişkenlerin farklı değerlerinde genel eğilimini koruyarak sadece üst veya alt su emme hızlarına doğru ötelenmiştir. En önemli fark uygulanan iki kür koşulunda elde edilmiştir (Şekil 7.19). En büyük su emme hızları SD katkıli betonlara benzer şekilde en yüksek S/B oranı ve bağlayıcı miktarı ile üretilen betonlarda görülmüş fakat SD katkıli betonlardan farklı olarak artan UK/B oranı su emme hızını sürekli azaltmamış, belli bir noktada en düşük seviyeye ulaştırdıktan sonra tekrar artırmaya başlamıştır. Diğer bir deyişle optimum UK/B oranı elde edilmiştir.



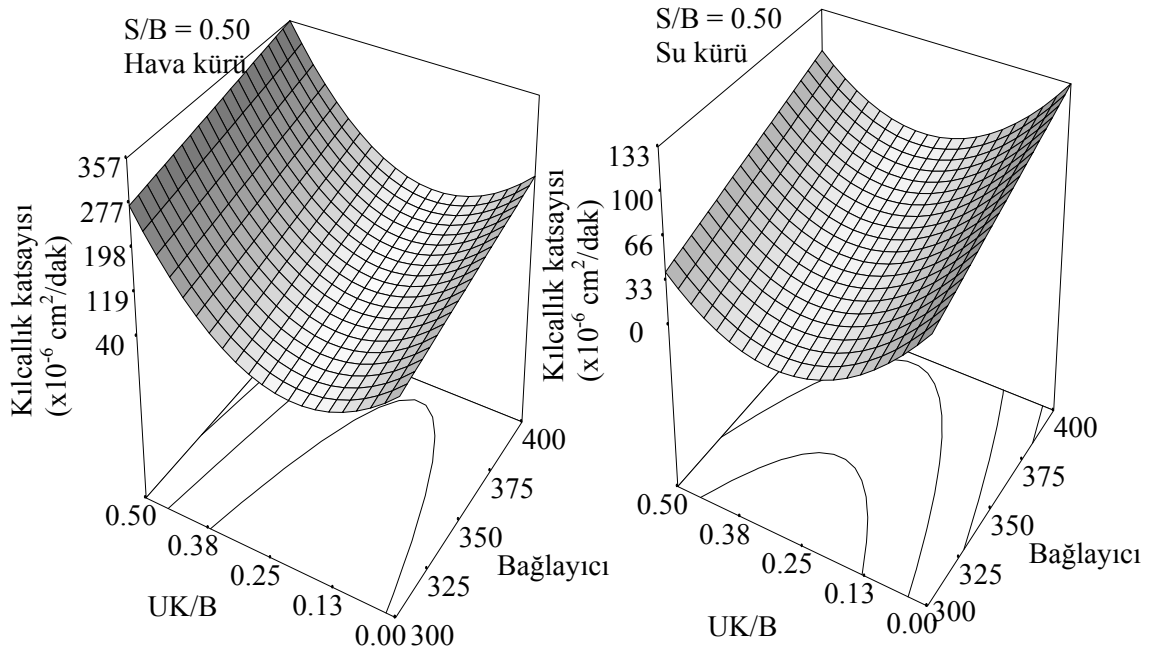
Şekil 7.19: İki kür koşulunda 0.60 S/B oranına sahip uçucu kül katkıli betonların UK/B oranı ve toplam bağlayıcı miktarının yüzeYden su emme hızına etkisi

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi havada tutulan betonlarda bulunan uçucu külün puzolanik reaksiyonunu tamamlaması için gereken su ihtiyacı karşılanmadığından, sadece beton karışım suyunun kullanılmasıyla reaksiyonun bir miktarı gerçekleşmektedir. Bu nedenle en düşük su emme hızı, 0.232 UK/B oranında elde edilmiştir; aslında bu seviyenin bile havada tutulan betonlar için yüksek olduğu düşünülebilir. Kullanılan Tunçbilek uçucu külünün yaygın olarak kullanılan küllerden daha ince taneli olması nedeni ile doldurma etkisinin de devreye girmiş olma olasılığı yükselmektedir. Uçucu kül bu özelliği ile kılcak boşlukların sürekliliğini bozarak su emme hızlarının yavaşlamasına neden olmuş olabilir. Su

kürü uygulanan betonlarda ise su emme hızı havada saklanan numunelere göre daha yüksek UK/B oranına (0.308) kadar azalmış ve bu düzeyde en düşük değerine ulaşmıştır.

7.2.6 Kılcal Su Emme Deneyi

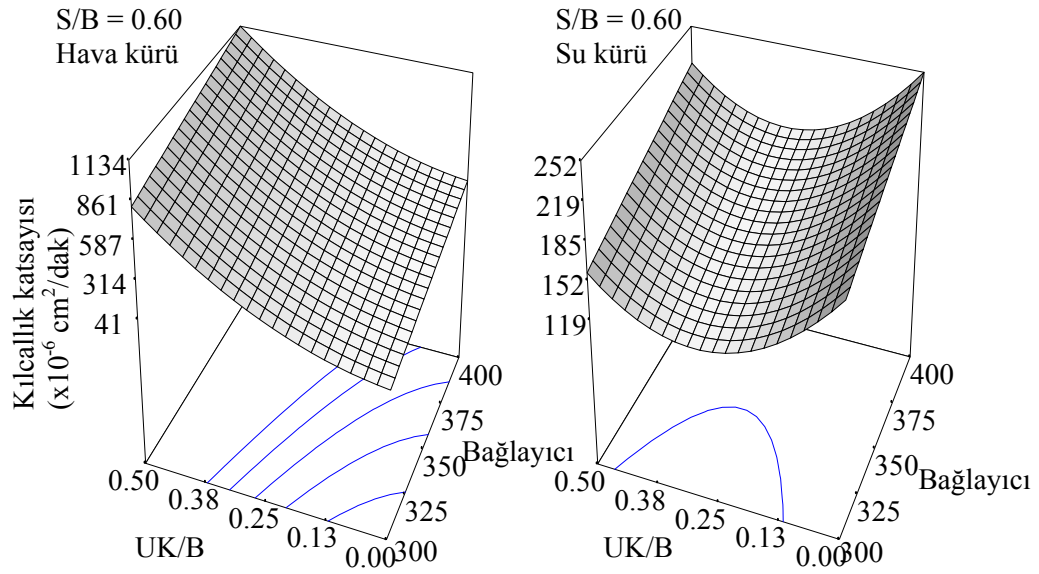
Birim zamanda birim alandan emilen su miktarına bağlı olarak hesaplanan kılcallık katsayısı, beton içerisindeki kılcal boşlukların miktarı ve sürekliliği ile ilişkilidir. Bu bakımdan yüzeyden su emme deneyinde (ISAT) kılcal boyuttaki boşluk miktarı o kadar önemli olmadığı halde her iki deney sonucu için elde edilen tepki yüzeyleri son derece benzerdir (Şekil 7.20).



Şekil 7.20: İki kür koşulunda 0.50 S/B oranına sahip uçucu kül katkılı betonların UK/B oranı ve toplam bağlayıcı miktarının kılcallık katsayısına etkisi

En düşük kılcallık katsayılarını elde etmek için gerekli UK/B oranı da YSE deneyinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde havada saklanan betonlarda 0.19, su kürü uygulanan betonlarda 0.286 olarak bulunmuştur.

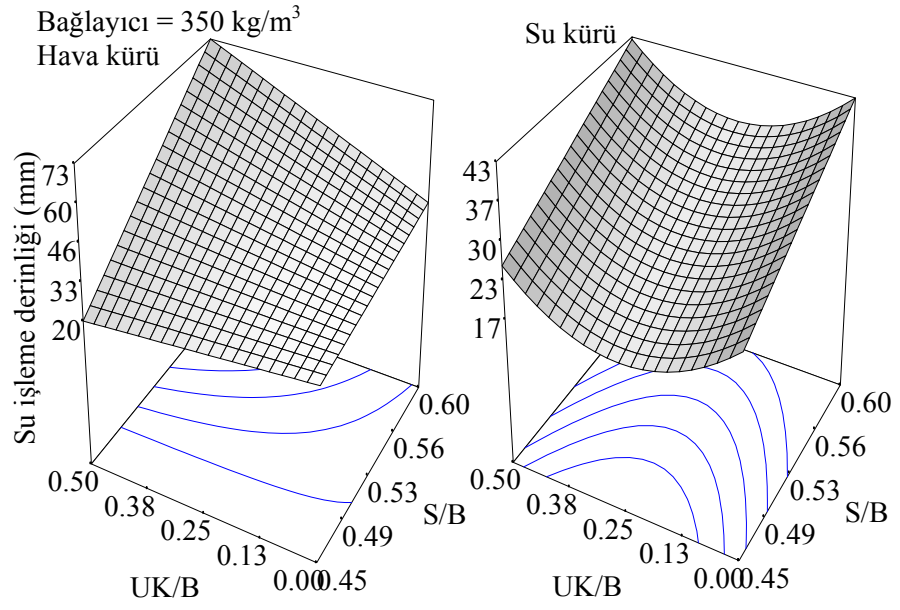
Havada saklanan betonlarda S/B oranının 0.60'a çıkarılması durumunda beton daha geçirimsiz olduğu için kuruması daha hızlı gerçekleşmiş ve yetersiz kalan karışım suyu UK'ün puzolanik etkisini tam olarak ortaya çıkaramamıştır. Bu nedenle UK/B oranının artışı kılcallık katsayısında herhangi bir azalmaya neden olmamış ve sürekli arttırmıştır (Şekil 7.21).



Şekil 7.21: İki kür koşulunda 0.60 S/B oranına sahip uçucu kül katkılı betonların UK/B oranı ve toplam bağlayıcı miktarının kılcallık katsayısına etkisi

7.2.7 Basınçlı Geçirimlilik Deneyi

Toplam bağlayıcı dozajının etkili bulunmadığı basınçlı geçirimsizlik deneylerinden elde edilen yüzeyler Şekil 7.22.'de görülmektedir. Laboratuvarda açıkta saklanan numuneler incelendiğinde, en yüksek su işleme derinliğinin %50 oranında UK içeren ve 0.60 S/B oranına sahip betonlarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu numunelerde azalan UK miktarı sürekli olarak su işleme derinliklerinde de azalma meydana getirmiştir. Ancak, S/B oranının düşmesiyle birlikte UK/B oranının etkisi azalmış ve 0.45 değerine ulaştığında su işleme derinliği üzerindeki etkisi tamamen kaybolmuştur. Havada tutulan betonların ölçülen diğer özelliklerinde görülen optimum UK/B oranı, basınç altında su işleme derinliğinde oluşmamıştır. Diğer taraftan suda saklanan numunelerde Şekil 7.11'de de gösterildiği üzere, tüm bağlayıcı miktarında ve S/B oranlarında %25.3 oranında UK içeren betonların en düşük su işleme derinliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.22).



Şekil 7.22: Her iki kuru koşulu için elde edilen basınçlı su geçirimsizliği deney sonuçları

7.3 Optimum Karışımlar

7.3.1 Optimizasyon Prensibi

Bu çalışmada uygulanan çok koşullu optimizasyonlarda birden fazla faktör (girdi ve/veya çıktı) için eşzamanlı olarak belirli bir amaç değeri belirlendikten sonra istenilirlik (desirability) fonksiyonları yardımıyla söz konusu amaç değeri esas alınarak istenilirlik seviyesi tespit edilmektedir. İstenilirlik seviyesi 0 ile 1 arasında olup, 1, mutlak amaç değeri gösterirken istenilirliğin azalması bu değeri 0'a doğru yaklaştırmaktadır.

Bir faktörün maksimize veya minimize edilmesi durumunda o faktörün herhangi bir değerinin istenilirlik düzeyinin hesaplandığı fonksiyonlar sırasıyla 7.1 ve 7.2 ifadeleriyle gösterilmiştir (Myers ve Montgomery, 2002).

$$d_i = \begin{cases} 0 & A_i \leq \min F_i \\ \left[\frac{A_i - \min F_i}{\max F_i - \min F_i} \right]^t \text{ ve } 0 < d_i < 1 & \min F_i < A_i < \max F_i \\ 1 & A_i \geq \max F_i \end{cases} \quad (7.1)$$

$$d_i = \begin{cases} 1 & A_i \leq \min F_i \\ \left[\frac{\max F_i - A_i}{\max F_i - \min F_i} \right]^t \text{ ve } 0 < d_i < 1 & \min F_i < A_i < \max F_i \\ 0 & A_i \geq \max F_i \end{cases} \quad (7.2)$$

Burada $\min F_i$ ve $\max F_i$, i faktörünün incelenen aralıktaki alt ve üst sınırlarını, A_i , aynı faktörün istenilirlik düzeyi belirlenmesine çalışılan gerçek değerini, d_i ise yine i faktörünün istenilirlik değerini göstermektedir. Faktörün istenilirlik fonksiyonu içerisindeki ağırlığı t üstel terimi ile ifade edilmiştir.

Herhangi bir bileşimin tüm girdi ve çıktıların maksimize veya minimize edilmesine bağlı olarak 7.1 ve 7.2 denklemlerine göre hesaplanan istenilirlik değerlerinin aritmetik ortalaması söz konusu bileşimin istenilirliğini göstermektedir (7.3).

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{1/m} \quad (7.3)$$

Burada m ifadesi optimizasyona dahil olan toplam faktör sayısını vermektedir. Sonuç olarak her faktörün her bir değerinin maksimize veya minimize edilmesine bağlı olarak istenilirlik değerleri hesaplanmakta ve böylece tüm karışımların istenilirliklerinin tepki yüzeyleri çizilebilmektedir.

7.3.2 Beton Özelliklerinin Analizi

Donatı korozyonu deneylerinin yapılacağı beton karışımları iki farklı özellikte olacak şekilde belirlenmiştir. Birinci şekilde, betonların geçirimsizlik özelliklerini en aza indiren, ikincisinde ise en yüksek değerleri veren karışımlar saptanmıştır. Böylece korozyon üzerinde iki uç özellikteki betonların etkisi belirlenmiş olacaktır. Bu amaçla, yukarıda sözü edilen aynı istatistiksel analiz programından yararlanılmıştır.

Silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonlardan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucunda klorür geçirimsizliği ve su geçirimsizliklerini en küçük ve en büyük yapacak optimum karışımlar belirlenmiştir (Tablo 7.21 ve 7.22). Ayrıca uygulamaya benzemesi açısından havada saklanan C30 sınıfındaki betonlar arasında en yüksek geçirimsizliğe sahip olan karışım da saptanmıştır. Daha sonra bu karışımlar, geçirimsizliğin gömülü donatı korozyonu üzerine etkisini incelemek amacıyla üretilmiş ve içlerine donatı yerleştirilerek lolipop numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 7.21: Silis dumanı katkılı betonlar için belirlenen optimum karışımlar

Optimum karışımlar için ön şartlar	Karışım bileşenleri			Tahmin edilen deney sonuçları				
	Bağlayıcı (kg/m ³)	S/B	SD/B	B. dayanımı (MPa)	HKG (Coulomb)	ISAT (ml/m ² /dak)	Kılcallık k. (x10 ⁶ cm ² /dak)	Kür
Min su geç.	300	0,48	0,12	50,4	520	0,078	44	Su
Min klorür geç.	303	0,50	0,091	46,4	253	0,142	49	Su
Maks su geç.	400	0,58	0,03	40,9	4579	0,807	678	Hava
C30 & Maks geç.	400	0,53	0,053	43,0	2799	0,599	410	Hava

Tablo 7.22: Uçucu kül katkılı betonlar için belirlenen optimum karışımlar

Optimum karışımlar için ön şartlar	Karışım bileşenleri			Tahmin edilen deney sonuçları				
	Bağlayıcı (kg/m ³)	S/B	UK/B	B. dayanımı (MPa)	HKG (Coulomb)	ISAT (ml/m ² /dak)	Kılcalık k. (x10 ⁻⁶ cm ² /dak)	Kür
Min su geç.	301	0,47	0,20	59,3	391	0,079	0	Su
Min klorür geç.	307	0,47	0,35	57,8	63	0,119	25	Su
Maks su geç.	400	0,60	0,40	41,4	4412	0,666	877	Hava
Maks klorür geç	337	0,60	0,40	39,4	4762	0,614	634	Hava
C30 & Maks geç.	400	0,60	0,37	43,0	4232	0,630	818	Hava

7.3.3 Maliyet Analizi

Üretilen tüm betonların maliyetleri Tablo 7.23'te verilen birim değerler esas alınarak belirlenmiş ve önceki bölümlerde ele alınan beton özelliklerine benzer şekilde istatistik programı kullanılarak analizi yapılmış, ve tepki yüzeyleri çizilmiştir. Tablo 7.24'te gösterilmiş olan varyans analizi sonuçlarına göre incelenen beton bileşim parametrelerinin her biri önemli ölçüde anlamlı bulunmuştur. Kendi aralarında sıralama yapmak gerekirse, SD katkılı betonlarda anlamlılık sırası büyükten küçüğe olmak üzere toplam bağlayıcı miktarı, SD/B oranı ve S/B oranı şeklinde dizilirken, UK katkılı betonlarda F değeri en yüksek olan UK/B oranını S/B oranı ve toplam bağlayıcı miktarı izlemiştir. Uçucu külün beton içerisinde çimento yerine kullanılma oranının silis dumanının üç katından fazla olması nedeniyle UK/B oranı beton maliyeti üzerinde en etkili parametre haline gelmiştir. Yine aynı nedenden, yani toplam bağlayıcı miktarının etkisinin önemli bir bölümü UK/B oranında temsil edildiğinden dolayı toplam bağlayıcı miktarının etkisi de son sıraya gerilemiştir.

Tablo 7.23: Beton bileşenlerinin birim fiyatları

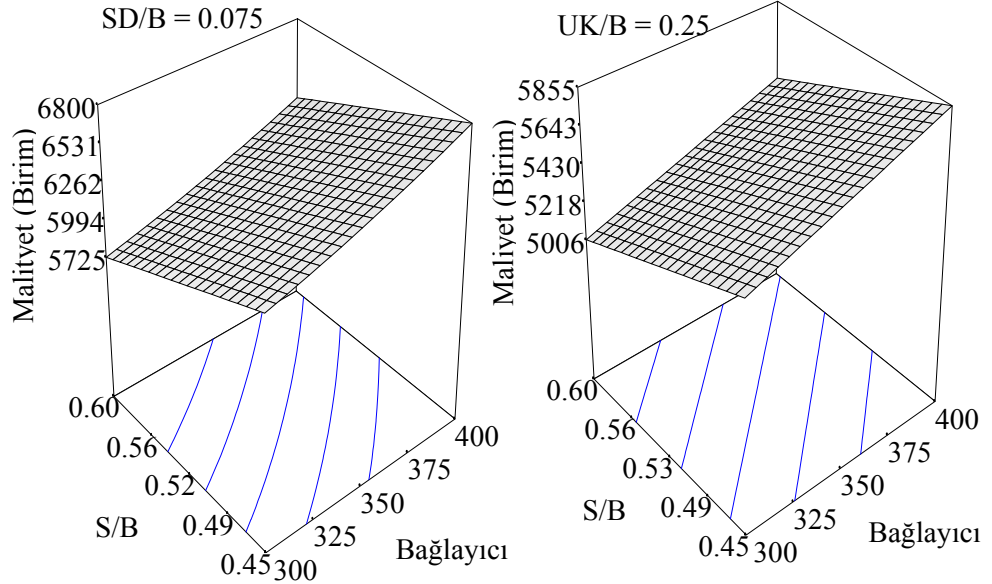
Malzeme	Birim fiyat*
Çimento	10
Su	0.33
Uçucu kül	5
Silis dumanı	20
Kırmataş I ve II	1
Kırma kum	1
Doğal kum	1.67
Kimyasal katkı	200

* 1 birim = 0.011 YTL/kg

Tablo 7.24: Beton maliyetlerinin varyans analizi sonuçları

Değişken	Silis dumanı		Uçucu kül	
	F Değeri	Prob>F	F Değeri	Prob>F
Model	305.73	< 0.0001	215.39	< 0.0001
x_1	508.27	< 0.0001	168.30	< 0.0001
x_2	327.59	< 0.0001	189.32	< 0.0001
x_3	379.19	< 0.0001	288.55	< 0.0001
x_1^2	7.89	0.0132	-	-
x_2^2	-	-	-	-
x_3^2	-	-	-	-
$x_1 * x_2$	-	-	-	-
$x_1 * x_3$	-	-	-	-
$x_3 * x_2$	-	-	-	-

Şekil 7.23'te verilen, her iki mineral katkının ortalama değerlerinin kullanıldığı beton maliyeti tepki yüzeyleri incelendiğinde genel karakterin aynı olduğu görülmektedir. Ancak silis dumanlı beton maliyetleri uçucu küllülere göre yaklaşık %15-20 daha yüksek bulunmuş ve en yüksek maliyetli betonla en düşük maliyetli beton arasındaki farkın uçucu küllü betonlara göre bir miktar daha fazla olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.23: Beton maliyeti tepki yüzeyleri

Bölüm 7.3'te geçirimsizlik ve basınç dayanımı değerlerine bağlı gerçekleştirilen optimizasyon sonuçlarında beton maliyetleri hesaba katılmamıştır. Bu nedenle en düşük geçirimsizlik ve en yüksek dayanıma sahip betonların en ekonomik olanını belirlemek amacıyla ayrı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Boşluk oranı, basınç dayanımı ve geçirimsizliği etkileyen bir parametre olduğundan dolayı değerlendirmeye alınmamıştır. Beton maliyetinin ölçülen beton özelliklerinin toplam etkisiyle aynı derecede olması için ağırlığı (importance) beşinci derece seçilirken dört adet farklı geçirimsizlik özelliklerinin ve bir adet dayanımın ağırlığı birinci derece olarak kabul edilmiştir. Böylece beş farklı beton özelliğinin toplam etkisinin maliyetin etkisiyle eşit olması sağlanmıştır. Optimizasyon sonuçları Tablo 7.25'te verilmiştir.

Tablo 7.25: En yüksek performanslı ve düşük maliyetli beton karışımları

<i>Kullanılan puzolan</i>	<i>Karışım bileşenleri</i>			<i>Kür koşulları</i>	<i>İstenilirlik (Desirability)</i>	
	<i>Bağlayıcı, (kg/m³)</i>	<i>S/B</i>	<i>SD/B UK/B</i>			
Silis	300	0.48	0.03	-	Su	0.735
dumanı	300	0.48	0.03	-	Hava	0.742
Uçucu kül	300	0.49	-	0.40	Su	0.809
	300	0.46	-	0.40	Hava	0.796

Burada, istenilen kriterlere en fazla sahip olan betonun istenilirlik adı verilen değeri bire yaklaşmakta, beton özellikleri bu kriterlerden uzaklaştıkça istenilirliği sıfıra doğru azalmaktadır.

Uçucu külün çimento maliyetinin yarısı, silis dumanının ise iki katı olması nedeniyle en ekonomik karışımların incelenen aralıkta en düşük silis dumanı veya en yüksek uçucu kül miktarına sahip betonların olacağı kolayca tahmin edilebilir. Silis dumanı katkılı betonlarda her iki kür koşulu için de aynı bileşim en uygun bulunmuştur ancak söz konusu bileşim havada saklanan betonlar arasında daha yüksek performanslı olması nedeniyle daha yüksek bir istenilirlik değerine sahip olmuştur. Uçucu küllü betonlarda belirli bir bağlayıcı miktarında S/B oranının azalması maliyetin yükselmesi anlamına geleceğinden, suda saklanan betonlarda en uygun karışımın 0.49 S/B oranına sahip beton olduğu görülmüştür. Havada saklanan betonlarda ise yüksek orandaki uçucu külün puzolanik reaksiyonunun tamamlanamamasından dolayı, kimyasal katkıdan kaynaklanan maliyet artışına

rağmen S/B oranı 0.46 olan betonlar en ekonomik ve yüksek performanslı beton olarak bulunmuştur.

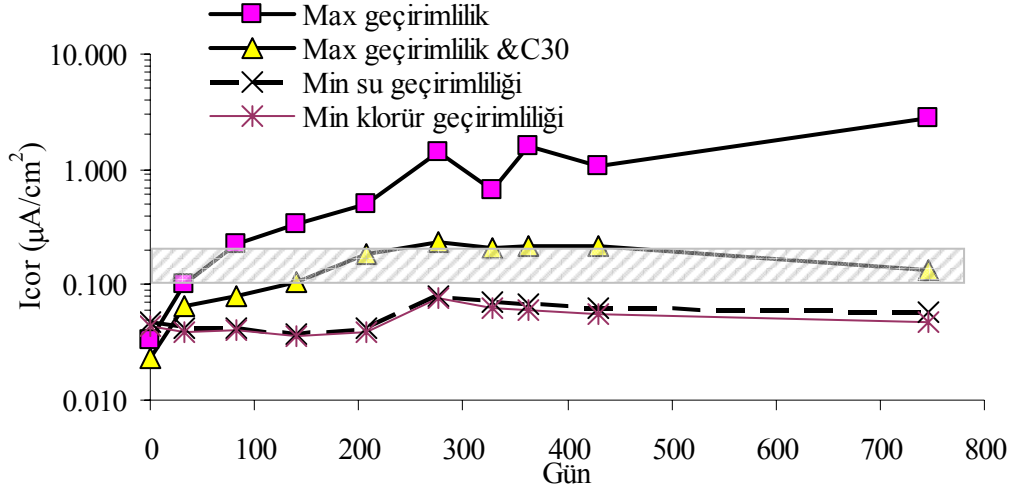
7.4 Korozyon Deneyleri

Yukarıda belirtilen ve bileşenleri Tablo 7.21 ve 7.22’de verilen optimum karışımlar kullanılarak 10x20 cm boyutlarında silindir şeklinde numuneler üretilmiştir. Silindir çaplarının tam ortasına silindir ana eksenine boyunca uzanacak şekilde 10 mm çaplı nervürlü çelik (St.420a kalitesinde) donatılar yerleştirilerek, literatürde lolipop adı verilen numuneler hazırlanmıştır (Şekil 7.24). Bu şekilde, her bir karışım için 6 adet olmak üzere 54 adet deney numunesi (lolipop) üretilmiştir. Üretimden itibaren 90 gün süresince numunelerin yarısı suda, diğer yarısı havada saklanmıştır. Ardından, tamamı 1 M NaCl çözeltisi içerisine yerleştirilmiş, 15 gün çözelti içerisinde ve 15 gün havada tutulmaktan oluşan ıslanma-kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Lineer polarizasyon yöntemi ile korozyon hızı ölçümü yapabilen GECOR 8 adındaki alet kullanılarak, ilki çözelti havuzuna yerleştirmeden hemen önce olmak üzere numuneler üzerinde aylık ölçümler alınmıştır. Silis dumanı katkılı betonların korozyon hızı (I_{kor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve öz direnç (ρ) değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 7.25, 7.26 ve 7.27’de, UK katkılı betonların grafikleri Şekil 7.28, 7.29 ve 7.30’da verilmiştir.

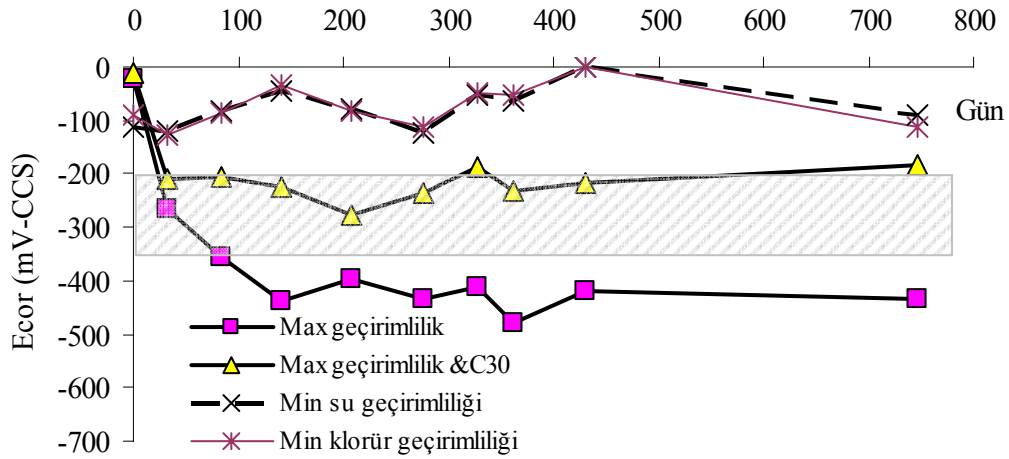


Şekil 7.24: Sodyum klorür çözeltisi içerisinde bekleyen lolipop numuneler

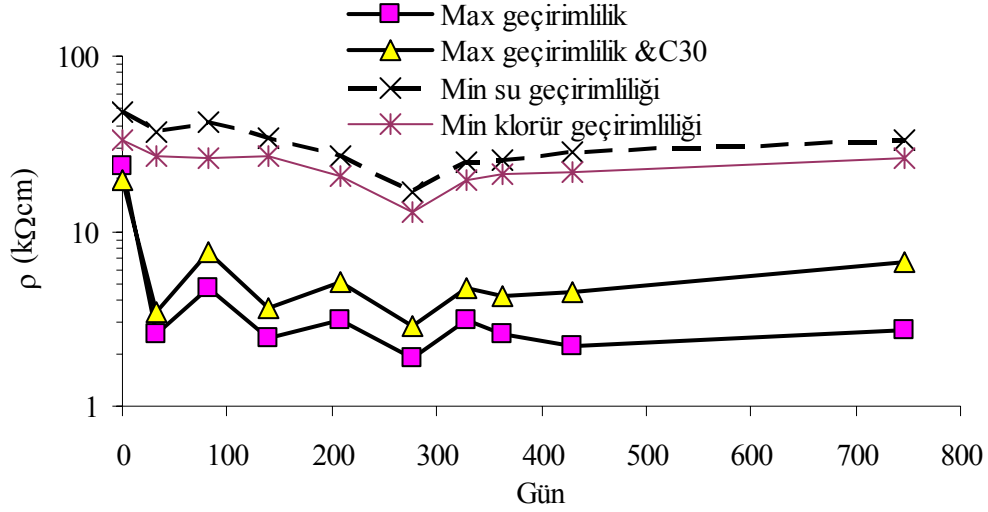
Özellikle düşük geçirimsiliğe sahip ve su içinde kür edilmiş betonlarda korozyon oluşumunu hızlandırmak için en doğal yöntem olan yüksek klorür konsantrasyonuna sahip çözelti tercih edilmiş ve ıslanma kuruma çevrimleri uygulanmıştır. Böylece hem doğal geçirimsizlik süreçlerine müdahale edilmemiş hem de en yoğun korozyon görülen deniz yapılarındaki gel-git bölgesi olarak adlandırılan (oksijen ve klorür konsantrasyonunun korozyon oluşumu için en uygun düzeyde olduğu) bölge incelenmiştir.



Şekil 7.25: Silis dumanı katkılı optimum karışımların klorür etkisinde korozyon hızı gelişimi



Şekil 7.26: Silis dumanı katkılı optimum karışımların klorür etkisinde korozyon potansiyeli gelişimi

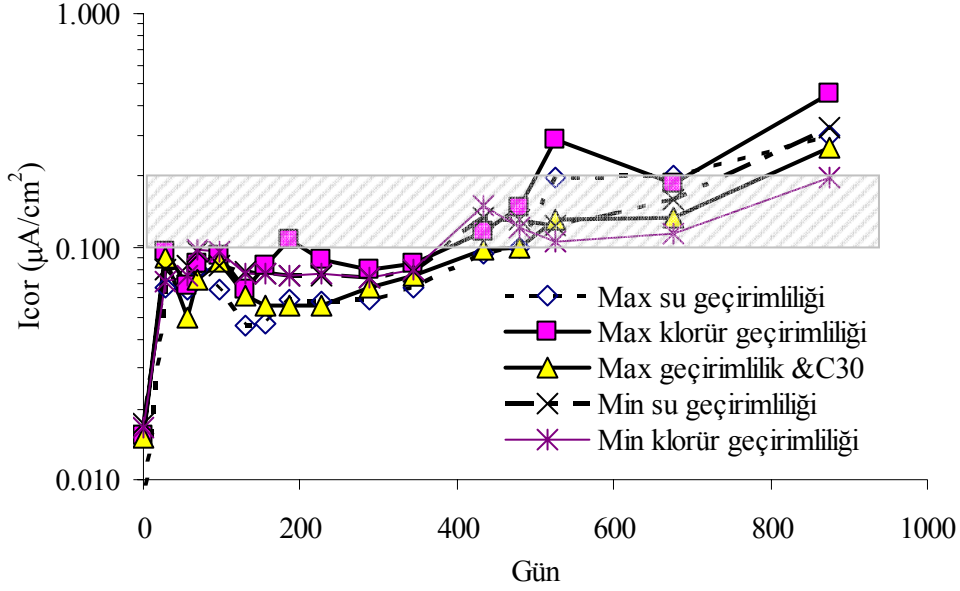


Şekil 7.27: Silis dumanı katkılı optimum karışımların klorür etkisinde beton özdirenci gelişimi

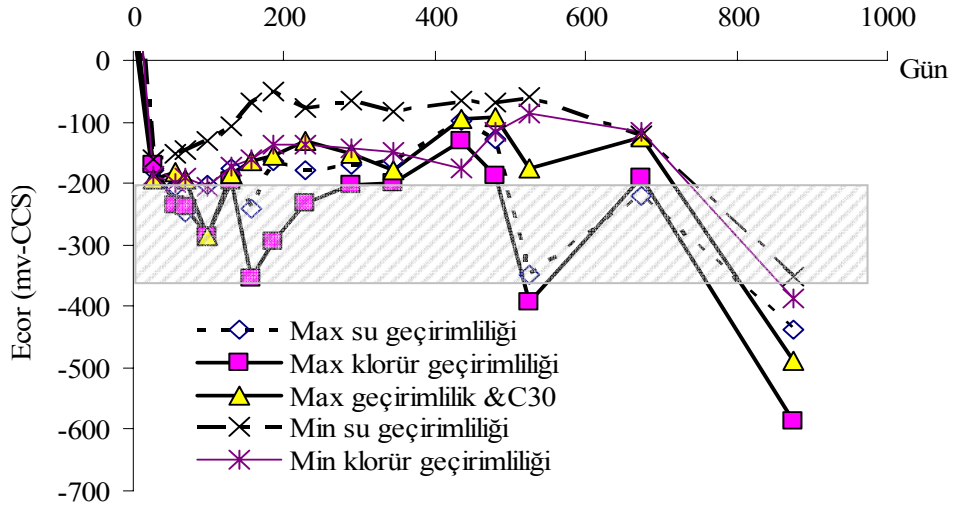
Korozyon hızı ve korozyon potansiyeli grafiklerinde korozyon başlangıcı için kritik olan bölgeler grafiklerde taralı olarak gösterilmiştir. Bu bölgenin üst kısmı korozyon hızı grafiğinde aktif, korozyon potansiyeli grafiğinde pasif durumu işaret etmektedir. Diğer bir deyişle aktif korozyon görülen numunelerin korozyon hızları taralı bölgenin üst kısmına, korozyon potansiyelleri ise daha negatif değerlere, yani kritik bölgenin alt kısmına doğru ilerlemektedir.

Silis dumanı katkılı betonlar arasında en yüksek geçirimsizliğe sahip olan betonda ilk 3 ay içerisinde korozyon başlamıştır. Korozyon hızı (Şekil 7.25) ve korozyon potansiyeli (Şekil 7.26) grafiklerinde aktif korozyon bölgesine geçiş anı birbirleriyle uyumludur. Yine yüksek geçirimsizliğe sahip, havada saklanmış fakat C30 dayanım sınıfında olan karışım iki yıl sonunda kritik bölgeyi aşamamıştır. Diğer bir deyişle bu betonda aktif korozyonun başladığı kesin olarak söylenememektedir. Şantiyede dökülen betona uygulanabilecek kür şartlarına en yakın durumu temsil eden betonun (laboratuarda açıkta saklanması durumu) klorür etkisinde korozyon davranışını gösteren bu sonuçlara göre beton sınıfının C30'un altına düşmemesi gerektiği sonucu çıkarılabilir. Beton özdirençlerinin değişimini gösteren grafik (Şekil 7.27) incelendiğinde, numunelerin 1 M NaCl çözeltisine daldırılmasıyla birlikte, özellikle geçirimsiz olan iki betonda tuzlu su çözeltisinin betona girmesi nedeniyle özdirençte ani bir azalma görülmüş, daha sonra ortamın sıcaklık, nem durumu gibi özelliklerine bağlı olarak birtakım ufak değişiklikler görülse de iki yıl içinde genel olarak aynı seviyede kaldığı ölçüm sonuçlarıyla belirlenmiştir. En düşük su ve klorür

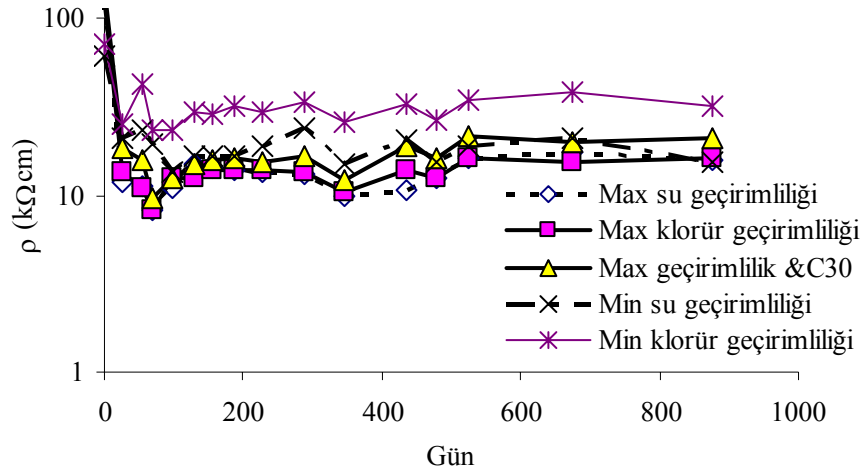
geçirimliliğine sahip betonlarda ölçülen korozyon hızı, korozyon potansiyeli ve öz direnç değerleri ise bu süre içerisinde aynı çizgide hareket etmiş, hiçbir korozyon oluşum belirtisi gözlenmemiştir (Şekiller 7.25 – 7.27).



Şekil 7.28: Uçucu kül katkıli optimum karışımların klorür etkisinde korozyon hızı gelişimi



Şekil 7.29: Uçucu kül katkıli optimum karışımların klorür etkisinde korozyon potansiyeli gelişimi



Şekil 7.30: Uçucu kül katkılı optimum karışımların klorür etkisinde beton özdirenci gelişimi

Uçucu kül katkılı betonlardan en yüksek ve en düşük geçirimsizliğe sahip olanlar arasındaki fark SD katkılı betonlar kadar belirgin şekilde ortaya çıkmamıştır. Yaklaşık 550 gün sonunda en yüksek klorür ve su geçirimsizliğine sahip olan betonlarda korozyon başlarken diğerleri de kritik aşamaya ulaşmıştır. Yine havada tutulan fakat C30 dayanım sınıfındaki betonda 800'lü günlerde korozyon başlamıştır. Suda saklanan ve minimum geçirimsizlikteki iki betonda ise yaklaşık 900 gün sonunda kritik bölgelerin aktif korozyon başlangıç sınırlarına ulaşılmıştır. Bu betonlarda korozyon oluşumunun tam olarak başlama süresini üç yıla ulaşması beklenmektedir.

8. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıda sunulan yargılara varılabilir;

1. Uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonların geçirimsizlik ve basınç dayanımının bileşim parametrelerine bağlı olarak modellenmesi ve optimum karışımların bulunmasında “Merkezi Kompozit Tasarım Yöntemi” ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel tasarım yöntemlerinin yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıyla hem zaman kaybı önenebilecek hem de uygulamada daha çok kişisel deneyime dayanan beton bileşimlerinin belirlenmesi rasyonel bir temele oturtulabilecektir.
2. Silis dumanı katkılı betonlarda silis dumanı/bağlayıcı oranının artışı boşluk oranında bir miktar azalma meydana getirirse de basınç dayanımı değerlerinin varyans analizi sonucunda, silis dumanı/bağlayıcı oranındaki artışın incelenen aralıkta basınç dayanımını etkilemediği ortaya çıkmıştır.
3. İncelenen beton dayanımlarının çok yüksek sınıflarda olmaması nedeniyle matris fazının boşluk yapısı, geçirimsizliği ve dayanımı agrega fazına göre daha düşük düzeydedir. Bu nedenle, matris fazı miktarında artış anlamına gelen toplam bağlayıcı miktarının artışı tüm silis dumanı katkılı beton özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir.
4. Hızlı klorür geçirimsizliği deneyinde silis dumanının etkisi hem bağlayıcı miktarı, hem de su/bağlayıcı oranı etkisinden çok daha yüksek bulunmuştur. Silis dumanı kullanılmayan ve havada saklanan betonlarda su/bağlayıcı oranı oldukça etkiliyken silis dumanının katılmasıyla girmesiyle birlikte kontrolü de ele aldığı, özellikle su kuru uygulanan betonlarda bir optimum değere kadar artan silis dumanının su/bağlayıcı oranından bağımsız bir şekilde hızlı Coulomb değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Kısaca, suda kür edilen betonlarda klorür geçirimsizliğini büyük oranda silis dumanı miktarı belirlemektedir.

5. Su kürü uygulaması beton dayanım ve geçirimsizliğini hava krne göre arttırırken hızlı klorür geçirimsizliği deneyinde silis dumanı katkılı betonların klorür geçirimsizliğine karşı direncinin yaklaşık bir merteye daha fazla artması, su krnn boşluk miktarı ve yapısını olumlu anlamda geliştirmesinin yanında – bu durum puzolan katkılı betonlarda da geçerlidir – betonun elektriksel direncinin (beton boşluk suyundaki OH⁻ iyonlarının tespit edilmesi yoluyla) nemli oranda artmasından kaynaklandığını ispatlamaktadır.
6. Yüzeyden su emme (ISAT) ve kılcallık özellikleri üzerinde silis dumanı etkinliği su/bağlayıcı oranının azalmasıyla artmış ve buna bağlı olarak optimum silis dumanı karışım oranları da azalmıştır. Çünkü, düşük su/bağlayıcı oranlarında az olan boşlukların kılcal boyutta olanları silis dumanı tarafından doldurulmakta, agrega – imento arayüzeyi hem doldurma hem de puzolanik etkileriyle yoğun bir yapıya sahip olmakta, bu da geçirimsizliği azaltmaktadır.
7. Beton karma suyunun hidrasyonda kullanılması su kürü uygulanmayan betonlarda çok önemli olması nedeniyle, belirli bir su/bağlayıcı ile üretilen betonlardan yüksek bağlayıcı içeren karışımlar düşük bağlayıcılara göre avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, kr uygulamasının aksayabileceği durumlarda beton kalitesi açısından en az kaybın yüksek bağlayıcı miktarı kullanılmasıyla mümkün olacağı söylenebilir.
8. Uçucu kül katkılı betonların havada ve suda kr edilmesi durumunda elde edilen beton özellikleri arasındaki fark silis dumanlı betonlara göre daha fazla bulunmuştur. Özellikle yüksek oranlardaki farklar yüksek oranda uçucu kül içeren ve su/bağlayıcı oranı yüksek olan betonlarda görülmüştür. Sadece imento içeren betonların özelliklerinin kr koşullarına bağlı değişimi ise en düşük seviyede kalmıştır. Bu durum, uçucu kül katkılı betonların, uçucu kül içermeyen betonlara göre olumsuz kr koşullarından daha çok etkilendiğini, buna karşılık puzolansız betonların olumsuz kr koşullarını bir ölçüde tolere edebildiklerini göstermektedir.
9. Yüksek su/bağlayıcı oranlı yalın betonlarda imento dozajının artması ile azalan arayüzey miktarı dayanımın da artmasına yol açmaktadır. Ancak, aynı betonlarda su/bağlayıcı oranı düştüğünde arayüzeyin kalitesi de yükseldiği için arayüzey miktarı dayanım üzerinde etki yapmamaktadır. Öte yandan,

düşük bağlayıcı miktarında su/bağlayıcı oranı dayanım üzerinde yüksek dozajlı betonlara göre daha etkilidir. Düşük bağlayıcı dozajlı betonlarda toplam arayüzeyin daha fazla olması nedeniyle; su/bağlayıcı oranının iyileşmesi dayanımı daha fazla artırırken, yüksek su/bağlayıcı oranlı betonlarda göreceli olarak daha az miktardaki arayüzeyin iyileşmesi dayanım üzerinde daha az etkili olmaktadır.

10. Artan bağlayıcı miktarı, su kürü uygulanmayan numunelerin basınç dayanımını olumsuz yönde etkilerken su kürü uygulananlarda bağlayıcı içerisindeki uçucu kül miktarı %29.7'den düşük ise olumlu, bu seviyeden yüksek ise olumsuz yönde değiştirmiştir. Suda saklanan betonlarda toplam bağlayıcı miktarının %29.7 oranında uçucu kül içermesi halinde toplam bağlayıcı miktarının etkisinin kalkması, bu oranın istenilen dayanıma en düşük bağlayıcı oranıyla ulaşmak yani en ekonomik betonu üretmek için gerekli optimum seviye olduğunu göstermektedir. Harçların boşluk oranında bulunan kritik uçucu kül/bağlayıcı oranının 0.168 değerinden betonlarda basınç dayanımı için belirlenen kritik uçucu kül/bağlayıcı oranı olan 0.297'ye ötelenmesi, harçlarda iri agrega-çimento arayüzeyinin bulunmamasından kaynaklanmış olabilir.
11. Su kürü uygulanan betonlarda boşluk oranı ve basınç dayanımı için birbirinden bağımsız şekilde belirlenen optimum uçucu kül/bağlayıcı oranlarının son derece uyumlu olduğu görülmüştür.
12. Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları kür koşulları açısından değerlendirildiğinde; yüksek miktarda uçucu kül içeren ve su/bağlayıcı oranları yüksek olan betonlarda görülen fark, düşük uçucu kül/bağlayıcı ve su/bağlayıcı oranlı betonlarda görülenden yaklaşık 5 kat fazla bulunmuştur. Bu durum hızlı klorür geçirimsizliğinin özellikle yüksek uçucu kül/bağlayıcı ve su/bağlayıcı betonlarda olumsuz kür koşullarına daha fazla duyarlı olduğunu göstermektedir.
13. Havada saklanan betonların hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları üzerinde en etkili bileşen su/bağlayıcı oranı iken suda kür edilen aynı betonlarda uçucu kül/bağlayıcı oranı olduğu görülmüştür.
14. Havada saklanan düşük su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda artan bağlayıcı miktarının önce terlemeyi azaltıp devamında da kurumayı yavaşlatarak daha fazla beton karma suyunun hidrasyon ve puzolanik reaksiyonda

kullanılmasını sağlaması nedeniyle, su/bağlayıcı oranı 0.46'dan düşük olduğu zaman artan bağlayıcı miktarının kılcallık katsayısını düşürdüğü, daha yüksek su/bağlayıcı oranlarında ise daha geçirimli olan betonun karma suyunun buharlaşmasını engelleyememesi nedeniyle olumsuz etki gösterdiği belirlenmiştir.

15. Düşük oranda uçucu kül kullanıldığında, havada saklanan numunelerin kılcallık katsayıları su içerisinde tutulanların yaklaşık 3 katı olurken, en yüksek oranda uçucu kül kullanılanlarda bu oran 30 kattan fazla olmaktadır. Bu durum havada saklanan betonlarda puzolanik reaksiyonun tamamlanamamasından kaynaklanmaktadır.
16. Hazırlanan optimum karışımlar üzerinde yapılan deneylerde, korozyon başlama süreleri açısından korozyon hızı ve korozyon potansiyeli ölçümlerinin birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.
17. En düşük klorür ve su geçirimliliğine sahip olan optimum karışımlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, öncekinin klorür etkisinde korozyon oluşumunun – muhtemelen beton elektriksel direncinin diğerinden daha yüksek olması nedeniyle – daha uzun süre içerisinde gerçekleştiği görülmüştür.
18. Şantiyede dökülen betona uygulanabilecek kür şartlarına en yakın durumu temsil eden numunelerde (laboratuarda açıkta saklanması durumu) gömülü çelik donatının klorür etkisinde korozyon davranışı incelendiğinde beton sınıfının C30'un altına düşmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
19. Enerji tüketiminin ve doğal kaynaklarının kullanımının yaşanabilir bir dünyanın sağlanabilmesi amacıyla en düşük düzeyde tutulması için yapı hizmet sürelerinin de mevcut duruma göre daha fazla olması gerekliliği kabul edilmiştir. Bu nedenle üretilen betonun dayanıklılığı eskiye göre daha önemli hale gelmiştir. Mineral katkıları basınç dayanımında her zaman artışa neden olmasa da, uygun koşullar sağlandığında beton dayanıklılığını en fazla etkileyen geçirimlilik özelliklerini önemli ölçüde olumlu yönde değiştirdiği görülmüştür. Buna göre, dayanıklı bir beton üretmek için mutlaka yüksek dayanıma sahip olması gerektiği veya her yüksek dayanıma sahip betonun dayanıklı olmayabileceği bu çalışmada bir daha ortaya çıkmıştır.

9. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Bu çalışmada incelenen uçucu kül ve silis dumanına yüksek fırın cürufu da katılarak ayrı ayrı ve birlikte, çeşitli bağlayıcı kombinasyonları kullanılarak üretilen betonlar için doğal klorür difüzyonu sonucunda klorür geçirimsizlik katsayılarının belirlenmesi, klorür geçirimsizlik katsayısının beton bileşenlerine ve kür koşullarına bağlı olarak değişiminin bulunması literatürde mevcut önemli bir açığı kapatacak, klorür etkisinde korozyon oluşumu hakkında mühendislik dünyasına değerli katkıda bulunacaktır.

Ayrıca klorür etkisinde korozyon oluşumunda beton boşluk suyu kimyası etkisinin Cl^-/OH^- oranı cinsinden incelenmesi eşik klorür konsantrasyonunu belirlemede faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 201**, 1992, Guide to durable concrete, American Concrete Institute, **ACI 201.2R – 92**, Detroit, USA.
- ACI Committee 226**, 1991, Use of fly ash in concrete, American Concrete Institute, **ACI 226.3R – 87**, Detroit, USA.
- ACI Committee 233**, 1995, Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete, American Concrete Institute, **ACI 233R – 95**, Detroit, USA.
- ACI Committee 234**, 1996, Guide for the use of silica fume in concrete, American Concrete Institute, **ACI 234R – 96**, Detroit, USA.
- Aitcin, P.C., Miao, B., Cook, W.D. ve Mitchell, D.** 1994, Effect of size and curing on cylinder compressive strength of normal and high strength concretes, *ACI Materials Journal*, **91**[4], 349-354.
- Akman, M. S.** 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Aldea, C.M., Young, F., Wang, K. ve Shah, S.P.,** 2000, Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement, *Cement and Concrete Research*, Vol. **30**, pp. 465-472.
- Alekseev, S. N.,** 1993, Corrosion of steel reinforcement, in *Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Media*, pp. 164-247, Eds. Mallick, S.K. & Majithia, M., Balkema Publishers, Brookfield.
- Andrade, C.,** 1993, Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, *Cement and Concrete Research*, V. **23**, No. 3, , pp. 724-742.
- Asthana, K.K., Aggarwal L.K. ve Lakhani R.,** 1999, A Novel Interpenetrating Polymer Network Coating for the Protection of Steel Reinforcement in Concrete, *Cement and Concrete Research*, **29** pp. 1541-1548.
- ASTM C 618**, 2003, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.

- ASTM C 876**, 1991, Standart Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Steel in Concrete, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- ASTM C 1202**, 1997. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- ASTM G 46**, 1991, Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania
- ASTM G 59**, 1991, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- ASTM G 61**, 2003, Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- ASTM G 109**, 1992, Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments, *The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- Babu, G. K. ve Kumar, S. R.**, 2000, Efficiency of GGBS in concrete, *Cement and Concrete Research*, **30**[7], 1031-1036.
- Babu, G. K. ve Prakash, P. V. S.**, 1995, Efficiency of silica fume in concrete, *Cement and Concrete Research*, **25**[6], 1273-1283.
- Babu, G. K. ve Rao, G. S. N.**, 1996, Efficiency of fly ash in concrete with age, *Cement and Concrete Research*, **26**[3], 465-474.
- Ballim, Y.**, 1993 Curing and the durability of OPC, fly ash and blast furnace slag concretes, *Materials and Structures*, **26** (158): 238-244.
- Bayazıt, M.**, 1996, İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

- Bayramov, F.**, 2004, Çimento esaslı kompozit malzemelerin optimum tasarımı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bentur, A. ve Cohen, A.**, 1987, Effect of Condensed Silica Fume on the Microstructure of the Interfacial Zone in Portland Cement Mortars, *Journal of the American Ceramic Society* **70** [10], pp. 738–743
- Bentur, A., Diamond, S. ve Berke, N.S.**, 1997, Steel Corrosion in Concrete, E&FN Spon, London.
- Bentur, A. ve Mitchell, D.** 2008, Material performance lessons, *Cement and Concrete Research*, **38**, 259-272.
- Bentz, D. P.**, 2000, Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials II. Multi-scale modeling of concrete diffusivity, *Cement and Concrete Research*, **30**[7], 1121-1129.
- Boel, V., Audenaert, K., De Schutter, G., Heirman, G., Vandewalle, L., Desmet, B. ve Vantomme, J.**, 2007, Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash, *Materials and Structures*, **40**, pp. 507-516.
- Broomfield, J.P.**, 1997, Corrosion of Steel in Concrete, E&FN Spon, London.
- Brown, P. W., Shi, D. Ve Skalny W. R.** 1991, Porosity/Permeability relationships, in *Materials Science of Concrete II*, pp. 83-109, Eds. Skalny, J. & Mindess, S., American Ceramic Society, Westerville.
- Brunauer, S.** 1962, Tobermorite Gel: The Heart of Concrete, *Am. Scientist* **50**, pp. 211-229.
- BS 1881; Part 5**, 1970. Methods of testing hardened concrete for other than strength
- BS 1881, Part 208**, 1996, Testing for concrete: Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete, London.
- Chalee, W., Teekavanit, M. Kiattikomol, K. Siripanichgorn, A. ve Jaturapitakkul C.**, 2007, Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment, *Construction and Building Materials*, **21**, 965-971.

- Choi, Y.-S., Kim, J.-G. ve Lee, K.-M.**, 2006, Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete, *Corrosion Science*, **48**[7], 1733-1745.
- Christensen, B. J., Mason, T. O. ve Jennings H. M.**, 1992, Influence of silica fume on the early hydration of Portland cements using impedance spectroscopy, *Journal of American Ceramic Society*, **75** [4], pp.939-45.
- Claisse, P. A., El-Sayad, H. I. ve Shaaban, I. G.**, 1999, Permeability and pore volume of carbonated concrete, *ACI Materials Journal*, **96**[3], 378-381.
- Collepari, M., Baldini, G., Pauri, M. ve Corradi, M.**, 1978, Tricalcium aluminate hydration in the presence of lime, gypsum or sodium sulfate, *Cement and Concrete Research*, **8**[5], 571-580.
- Cook, R. A. ve Hover K. C.**, 1999, Mercury porosimetry of hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. **29**, pp. 591-601.
- Cyr, M., Lawrence, P. ve Ringot, E.**, 2006 ‘Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength’, *Cement and Concrete Research*, **36**[2], 264-277.
- Dhir, R. K., Jones, M. R. ve McCarthy, M. J.**, 1996, Binder content influences on chloride ingress in concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**[12], pp.1761-1766.
- Dhir, R. K., Tittle, P. A. J. ve McCarthy, M. J.**, 2000, Role of cement content in specifications for durability of concrete – a review, *Concrete*, **34**[10], pp.68-76.
- Diamond, S.**, 1983, Effects of microsilica on pore-solution chemistry of cement pastes, *Journal of American Ceramic Society*, **66**, pp.C-82-C-84.
- Diamond, S.**, 2000, Mercury porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. **30**, pp. 1517-1525.
- Dias, W. P. S.**, 2000, Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation, *Cement and Concrete Research*, **30**[8], 1255-1261.

- Dotto, J.M.R., de Abreu, A.G., Dal Molin, D.C.C. ve Müller, I.L.,** 2004, Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars, *Cement and Concrete Composites*, **26**, pp. 31-39.
- Duval R. ve Kadri, R.H.,** 1998, Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cement and Concrete Research*, **28**[4], pp. 533-547.
- Eglinton, M.,** 2004, Resistance of concrete to destructive agencies, in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp. 299-342, Ed. Hewlett, P. C., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- El-Dieb, A. S. ve Hooton, R. D.,** 1994, Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials for mercury intrusion porosimetry data, *Cement and Concrete Research*, **24**[3], 443-455.
- Elsener, B.,** 2001, Corrosion Inhibitors For Steel in Concrete-State of the Art Report, The Institute of Materials, Maney Publishing, Great Britain.
- Elsener, B., Büchler F., Stalder F. ve Böhni H.,** 1999, Migrating Corrosion Inhibitor Blend for Reinforced Concrete: Part 1 – Prevention of Corrosion”, *Corrosion*, **55**[12] pp. 1155-1163.
- Escalante, E. ve Ito, S.,** 1990, Measuring the Rate of Corrosion of Steel in Concrete, in *Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065*, pp.86-102, N.S.Berke, V.Chalker and D. Whitting, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Feldman, R. F., Chan, G. W., Brousseau, R. J. ve Tumidajski, P. J.,** 1994, Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test, *ACI Materials Journal*, V.**91**[2], pp. 246-255.
- Feldman R.F. ve Sereda, P.** 1970, A New Model for Hydrated Portland Cement and its Practical Implications, *Eng. J. Can.* **53** [8-9], pp. 53-59.
- Fidjestøl, P. ve Lewis, R.,** 2004, Microsilica as an addition, in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp. 679-712, Ed. Hewlett, P. C., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.

- Garboczi, E. J.**, 1990, Permeability, diffusivity and microstructural parameters. A critical review, *Cement and Concrete Research*, **20**[4], 591-601.
- Goldman, A. Ve Bentur, A.**,1989, Bond Effects in High-Strength Silica Fume Concretes, *ACI Materials Journal*, **86**, No. 5, pp. 440-449.
- Goto, S. ve Roy, D. M.**, 1981, The effect of W/C and curing temperature on the permeability of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, **11**[4], 575-579.
- Ho, D. W. S., Chua, C. W. ve Tam, C. T.**, 2003, Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, **33**[4], 595-601.
- Holland, T. C.**, 2005, Silica fume user's manual, *US Department of Transportation Federal Highway Administration Technical Report, FHWA-IF-05-016*, Washington.
- Hwang, K., Noguchi, T. Ve Tomosawa, F.**, 2004, Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete, *Cement and Concrete Research*, **34**[12], pp. 2269-2276.
- Jiang, L. H. ve Malhotra, V. M.**, 2000, Reduction in water demand of non air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash, *Cement and Concrete Research*, **30**, 1785-1789.
- Jones, D. A.**, 1996, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., Prentice Hall, NJ.
- Kayali, O. ve Zhu, B.**, 2005, Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution, *Cement and Concrete Composites*, **27**, pp.117-124.
- Keck, R. H. Ve Riggs, E. H.**, 1997, Specifying Fly Ash for Durable Concrete, *Concrete International*, **19**[4], pp. 35-38.
- Köksal, F.**, 2004, Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı ve optimum tasarımı, *Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Kumar, R. ve Bhattacharjee B.**, 2003, Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. **33**, pp. 155-164.

- Larbi, L. A.**, 1993, Microstructure of interfacial zone around aggregate particles in concrete, *Heron*, **38**, [1], pp. 69.
- Lawrence, C. D.**, 2004, The constitution and specification of Portland cements, in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp. 131-194, Ed. Hewlett, P. C., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- Lemoine, L., Wenger, F. ve Galland, J.**, 1990, Study of the Corrosion Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement", in *Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065*, pp.118-133, N.S.Berke, V.Chalker and D. Whitting, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Leng, F.G., Feng N.Q. ve Lu X.Y.** 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**[6], 989-992.
- Lessard, M., Sarkar, S.L., Ksinsik, D.W. ve Aitcin, P.C.**, 1992, Long-term behaviour of silica fume concrete, *Concrete International*, **14** [4], pp.25-30.
- Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P. ve Ryle, R.**, 2003, Cementitious additions, in *Advanced Concrete Technology; Constituent Materials*, chapter 3, Eds. Newman, J. & Choo, B. S., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- Lorentz, T. ve French, C.**, 1995, Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete: Effects of Materials, Mix Composition and Cracking, *ACI Materials Journal*, V. **92**[2], pp.181-190.
- Lui, Z. ve Beaudoin, J. J.**, 2000, The permeability of cement systems to chloride ingress and related test methods, *Cement Concrete and Aggregates*, **22**[1], pp. 16-23.
- Malhotra, V. M. ve Mehta, P. K.**, 2002, High-performance, high-volume fly ash concrete, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada.
- Malvar, L. J. Ve Lenke, L. R.**, 2006, Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction based on chemical composition, *ACI Materials Journal*, **103**, No. 5, pp. 319-326.

- Mangat, P.S. ve Molloy B.T.**, 1991, Influence of PFA, slag and micro silica on chloride induced corrosion of reinforcement in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. **21**, pp. 819-834.
- Mayfield, B.**, 1990, Properties of pelletized blastfurnace slag concrete, *Magazine of Concrete Research*, **42**[150], pp. 29-36.
- Mazloom, M., Ramezaniapor, A.A. ve Brooks, J.J.**, 2004, Effect of silica fume on mechanical properties of high strength concrete', *Cement and Concrete Composites*, **26**, pp. 347-357
- Mehta, P. K.**, 1992. Sulfate attack on concrete – A critical review, in *Materials Science of Concrete III*, pp. 105-130, Eds. Skalny, J. & Mindess, S., American Ceramic Society, Westerville.
- Mehta, P.K. ve Monteiro, P.J.M.**, 2006 Concrete:Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill, New York.
- Meland, I.**, 1986, Use of fly ash in cement to reduce alkali-silica reactions, *Journal of The American Concrete Institute*, **83**[2], p. 333.
- Meusel, J. W. ve Rose, J. H.**, 1983, Production of granulated blast furnace slag at sparrows point, and the workability and strength potential of concrete incorporating the slag, *Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete*, ACI SP-79, pp.867-890.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C. Ve Hubele, N. F.**, 2007, Engineering Statistics, Fourth Edition, John Wiley & Sons.
- Moon, H. Y., Kim, H. S. ve Choi, D. S.**, 2006, Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes, *Construction and Building Materials*, **20**, 725-732.
- Moon, H.Y. ve Shin, K.J.**, 2006, Evaluation on steel bar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures, *Cement & Concrete Research*, **36**, 521-529.
- Moranville-Regourd, M.**, 2004, Cements made from blastfurnace slag, in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp. 637-678, Ed. Hewlett, P. C., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.

- Moro, F. ve Böhni, H.**, 2002, Ink-Bottle Effect in Mercury Intrusion Porosimetry of Cement-Based Materials, *Journal of Colloid and Interface Science*, **246**, pp. 135–149
- Myers, R. H. ve Montgomery, D. C.**, 2002, Response Surface Methodology, Second Edition, John Wiley & Sons.
- Nagataki, S. ve Wu, C.**, 1995, A study of the properties of Portland cement incorporating silica fume and blast furnace slag, *Proc. 5th CANMET/ACI Int. Conf. On The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-153, pp.1051-1068.
- Neville, A.M.** 2000, Properties of Concrete, Pearson Prentice Hall, Essex.
- Nilsson, L-O.**, 2003, Durability concept; pore structure and transport processes, in *Advanced Concrete Technology; Concrete Properties*, chapter 8, Eds. Newman, J. & Choo, B. S., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- Nokken, M. R. ve Hooton, R. D.**, 2008, Using pore parameters to estimate permeability or conductivity of concrete, *Materials & Structures*, **41**, 1-16.
- Odler, I.**, 2004, Hydration, setting and hardening of Portland cement, in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp. 241-297, Ed. Hewlett, P. C., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- Özer, B. ve Özkul, M.H.**, 2004, 'The influence of initial curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes', *Cement & Concrete Research*, **34**, 13-18.
- Page, C.L., Short, N.R. and Holden, W.R.**, 1986, Influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research*, **16**[1], pp. 79-86.
- Pal, S.C., Mukherjee A. ve Pathak S.R.**, 2002 Corrosion behavior of reinforcement in slag concrete, *ACI Materials Journal*, **99**, No. 6, pp. 521-527.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G. ve Fardis, M.N.**, 1991, Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, **88**, No. 2, pp. 186-196.

- Papadakis, V. G. ve Tsimas, S.**, 2002, Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design, *Cement and Concrete Research*, **32**[10], 1525-1532.
- Pekmezci, B. Y.**, 2000, Uzuntarla trasının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkinliği, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pekmezci, B. Y. ve Akyüz S.**, 2004, Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, **34**[12], 2175-2179.
- Person, B.**, 1998, Seven-Year Study on the Effect of Silica Fume in Concrete, *Advanced Cement Based Materials*, **7**[3-4], pp. 139-155.
- Pinto, R. C. A. ve Hover, K. C.**, 1999, Superplasticizer and Silica Fume Addition Effects on Heat of Hydration of Mortar Mixes with Low Water-Cementitious Materials Ratio, *ACI Materials Journal*, **96**, No. 5, pp. 600-605.
- Pommersheim, J. ve Chang, J.**, 1988, Kinetics of hydration of tricalcium aluminate in the presence of gypsum, *Cement and Concrete Research*, **18**[6], 911-922.
- Poon, C. S., Lam L. ve Wong Y. L.**, 1999 Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11**, pp. 197-205.
- Poon, C. S., Wong Y. L. ve Lam L.**, 1997, The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, Vol. 11, pp. 383-393
- Powers, T. C.** 1958, The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, *Portland Cem. Assoc. R&D Bull.* **90**.
- Powers, T. C.** 1960, Physical Properties of Cement Paste, in *Proceedings of the Fourth International Conference on the Chemistry of Cement* (Washington D.C.), U.S. National Bureau of Standards Monograph 43, Vol. 2, pp. 577-613 (1962).
- Price, W.H.**, 1951, Factors influencing concrete strength, *Journal of American Concrete Institute*, **22**[6], 417-432.

- Rahhal V., Cabrera1, O. Talero R. ve Delgado A.**, 2007, Calorimetry of portland cement with silica fume and gypsum additions, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,. **87** [2], pp. 331–336.
- Ramezani pour A. A. ve Malhotra V. M.**, 1995, Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 17, pp. 125-133
- Rao, G. A.**, 2001, Role of water–binder ratio on the strength development in mortars incorporated with silica fume, *Cement and Concrete Research*, **31**[3], pp. 443-447.
- Richardson, M., Dodd, V. A., Lenehan, J. J., Conaty, S. ve O'Kiely, P.**, 1999, The Influence of Cement Content and Water/Cement Ratio on the Durability of Portland Cement Concretes exposed to Silage Effluent, *Journal of Agricultural Engineering Research*, **72**[2], pp.137-143.
- Robins, P.J., Austin, S.A., ve Issaad, A.**, 1992, Suitability of GGBFS as a cement replacement for concrete in hot arid climates, *Materials and Structures*, Vol. **25**, pp. 598-612.
- Roy, D. M. ve Idorn, G. M.**, 1983, Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete, *ACI Journal*, **79**[6], Nov.- Dec. pp. 445-457.
- Sağlam, A. R.**, 2003, Kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sagües, A.A., Pech-Canul, M.A. ve Shahid Al-Mansur A.K.M.**, 2003, Corrosion Macrocell Behavior of Reinforcing Steel in Partially Submerged Concrete Columns, *Corrosion Science*, V.**45**, pp.7–32.
- Sata, V., Jaturapitakkul C. ve Kiattikomol, K.**, 2007, Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **21**[7], 1589-1598.

- Scanlon, J. M. ve Sherman, M. R.**, 1996, Fly Ash Concrete: An Evaluation of Chloride Penetration Testing Methods, *Concrete International*, V. **18**[6], pp. 57-62.
- Schiessl, P.**, 1984, Protection of reinforcement, in *Durability of Concrete Structures*, pp. 241-297, Ed. Rostam, S., Technical University of Denmark, Lyngby.
- Senbetta, E. ve Scholer, C. F.**, 1984, A new approach for testing concrete curing efficiency, *Journal of American Concrete Institute*, **81**[1], 82-86.
- Shafiq, N. ve Cabrera, J. G.**, 2004, Effects of initial curing condition on the fluid transport properties in OPC and fly ash blended cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, **26**[4], pp. 381-387.
- Shi, C.**, 2004, Effect of Mixing Proportions of Concrete on its Electrical Conductivity and the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) Results, *Cement and Concrete Research*, **34**[3], pp. 537-545.
- Shi, C., Stegemann, J. A. ve Caldwell, R. J.**, 1998, Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) Results, *ACI Materials Journal*, **95**[4], pp. 389-394
- Sisomphon, K. ve Franke, L.**, 2007, Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials, *Cement and Concrete Research*, **37**[12], pp. 1647-1653.
- Song, H.M., Jang, J.C., Saraswathy, V. ve Byun, K.J.**, 2007 An estimation of the diffusivity of silica fume concrete, *Building and Environment*, **42**, 1357-1367.
- Song, H.W. ve Saraswathy, V.**, 2006, Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – An overview, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. **B138**, pp. 226-233

- Sujavanich S., Sida V. ve Suwanvitaya P.**, 2005, Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range water reducer, *ACI Materials Journal*, **102**, No. 3, pp. 177-182.
- Swamy, R. N. ve Laiw, J. C.**, 1995, Effectiveness of supplementary cementing materials in controlling chloride penetration into concrete, *Proc. 5th CANMET/ACI Int. Conf. On The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-153, pp.657-674.
- Şengil, İ.A.**, 1992, Korozyon, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Matbaası
- Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Mills, N., Barr, B. I. G. ve Lydon, F. D.**, 1999, Combined effects of silica fume, aggregate type and size on postpeak response of concrete in bending, *ACI Materials Journal*, **96**, No.1, 74-83.
- Thomas, M.D.A. ve Bamforth P.B.**, 1999, Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, **29**, pp. 487-495.
- Thomas, M. D. A., Fournier, B., Folliard, K. J., Shehata, M. H., Ideker, J. H. ve Rogers, C.**, 2007, Performance limits for evaluating supplementary cementing materials using accelerated mortar bar test, *ACI Materials Journal*, **104**, No. 2, pp. 115-122.
- Thomas, M.D.A. ve Matthews, J.D.**, 2004, Performance of pfa concrete in a marine environment—10-year results, *Cement and Concrete Composites*, **26**, pp. 5-20.
- Thomas, M.D.A., Matthews, J.D. & Haynes, C.A.**, 1989, The effect of curing on the strength and permeability of PFA concrete, *Proc. 3rd CANMET/ACI Int. Conf. On The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-114, pp.191-217.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K.**, 2003, Cürufklar ve cürüflü çimentolar, *Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu*, **Y97-2**, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği/AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- TS 706 EN 12620**, 2003, Beton agregaları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 197-1**, 2002. Çimento- bölüm 1: genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

- TS EN 206-1**, 2002, Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 450-1**, 2008, Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 450-2**, 2006, Uçucu kül – Betonda kullanım için – Bölüm 2, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-8**, 2002, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tumidajski, P. J. ve Lin, B.**, 1998, On the validity of the Katz-Thompson equation for permeabilities in concrete, *Cement and Concrete Research*, **28**[5], 643-647.
- Tuutti, K.**, 1982, Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A.**, 2003, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Türkiye Çimento müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Üneri, S.**, 1998, Korozyon ve Önlenmesi, Korozyon Derneği, Ankara
- Vissers, L. J. L.**, 1997, Fly ash as binder in concrete, *Studies in Environmental Science*, **71**, pp. 279-288
- Volkl, J.J. Beddoe, R.E. ve Setzer, M.J.** 1987, The Specific Surface of Hardened Cement Paste by Small-Angle X-Ray Scattering - Effect of Moisture Content and Chlorides, *Cement and Concrete Research*, **17**, pp. 81-87.
- Wang, J. C. ve Yan, P.-Y.**, 2006, Influence of initial casting temperature and dosage of fly ash on hydration heat evolution of concrete under adiabatic condition , *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **85**[3], pp. 755-760.
- Winslow D.N. ve Diamond, S.** 1974, Specific Surface of Hardened Cement Paste as Determined by Small-Angle X-Ray Scattering, *Journal of American Ceramic Society*, **57** [5], pp.193-97.

- Wood, S.I.**, 1991, Evaluation of the long-term properties of concrete, *ACI Materials Journal*, **88**[6], 630-643.
- Yang, C. C. ve Chiang C. T.**, 2005, On the relationship between pore structure and charge passed from RCPT in mineral-free cement-based materials, *Materials Chemistry and Physics*, **Vol. 93**, pp. 202-207.
- Yeğınobalı, A.**, 2003, Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı, **Y01.01**, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği/AR-GE Enstitüsü, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Ünal Anıl DOĞAN 1973 yılında Ankara’da doğdu. Orta öğrenimini Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Lisans ve yüksek lisans öğrenimlerini bitirdiği İ.T.Ü.’de 1998 yılında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2005 yılında İspanya – Madrit’te bulunan ‘Eduardo Torroja’ Yapı Bilimleri Enstitüsünde 9 ay süreyle konuk araştırmacı olarak çalıştı. İlgi duyduğu başlıca konular; betonun dayanıklılığı, mineral ve kimyasal katkıları, donatı korozyonu, kendiliğinden yerleşen beton olarak sıralanabilir. Evli ve bir çocuk babasıdır.