

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ufuk KANDİL

**ARALIK 2014
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

İnş. Müh. Ufuk KANDİL

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.11.2014
Tezin Savunma Tarihi : 18.12.2014**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Ufuk KANDİL tarafından hazırlanan

**UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 02/12/2014 gün ve 1579 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Üye : Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETCİ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada uçucu kül ve silis dumanı mineral katkılarının betonda çimento ile ikame edilerek kullanılması halinde betonun geçirimsizliği üzerine etkileri incelenmiştir.

Yüksek lisans danışmanlığımı üstlenerek derslerde, konu seçiminde, çalışmalarım için gerekli cihaz ve malzemelerin temininde yardımcı olan, çalışmalarımın yürütülmesi esnasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Gerek bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım gerekse çalışma süresi boyunca benden hiçbir yardımını esirgemeyen ve yol gösteren hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETCİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme; yardımlarından dolayı Arş. Gör. Mehmet Tevfik SEFEROĞLU, Arş. Gör. Safa NAYIR, Arş. Gör. Memduh NAS ve diğer asistan arkadaşlarıma ve ilgi ve yardımlarından dolayı tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Ufuk KANDİL
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Uçucu Kül ve Silis Dumanı İçeren Betonların Geçirimsizlik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/11/2014

Ufuk KANDİL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
1.3. Beton ve Özellikleri.....	4
1.3.1. Agregalar	5
1.3.2. Çimento	5
1.3.3. Su.....	6
1.3.4. Kimyasal Katkılar.....	7
1.3.5. Mineral Katkı Maddeleri (Puzolanlar)	8
1.3.5.1. Uçucu Kül.....	9
1.3.5.2. Silis Dumanı	11
1.3.5.3. Yüksek Fırın Cürufu.....	12
1.4. Literatür Özeti	13
1.5. Betonun Dayanımı.....	17
1.5.1. Betonun Dayanımını Etkileyen Faktörler.....	17
1.6. Betonda Dayanıklılık (Durabilite).....	18
1.6.1. Betonun Geçirimsizlik Özellikleri.....	19
1.6.1.1. Betonun Boşluk Yapısı.....	20
1.6.2. Betonda Bozulma Mekanizmaları	21
1.6.3. Betonun Kılcal Su Emme Miktarının Belirlenmesi	24

1.6.4.	Basınçlı Su Geçirirliiliği	25
1.7.	Betona Gömülü Donatının Korozyonu.....	26
1.7.1.	Korozyona Yol Açan Etkenler	29
1.7.1.1.	Karbonatlaşma Etkisi	29
1.7.1.2.	Klorür Konsantrasyonunun Etkisi	29
1.8.	Betonlarda Klorür Geçirirliiliği	31
1.8.1.	Hızlı Klorür Geçirirliiliği.....	33
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	35
2.1.	Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler	35
2.1.1.	Agregalar	35
2.1.2.	Çimento	36
2.1.3.	Su.....	37
2.1.4.	Uçucu Kül.....	37
2.1.5.	Silis Dumanı	38
2.1.6.	Kimyasal Katkı Maddesi	38
2.2.	Beton Karışımları	38
2.3.	Üretilen Betonlar ve Kür Süreleri	39
2.4.	Yapılan Deneyler.....	42
2.4.1.	Taze Beton Deneyleri.....	42
2.4.1.1.	İşlenebilme (Çökme) Deneyi.....	42
2.4.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri	43
2.4.2.1.	Hızlı Klorür Geçirirliiliği Deneyi	43
2.4.2.2.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini	45
2.4.2.3.	Kılcal Su Geçirirliiliği Deneyi.....	48
2.4.2.4.	Basınç Dayanımı	49
2.4.2.5.	Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Deneyi	50
3.	BULGULAR	51
3.1.	Taze Beton Deneyleri.....	51
3.1.1.	Çökme Deneyi Sonuçları.....	51
3.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri	52
3.2.1.	Hızlı Klorür Geçirirliiliği Deney Sonuçları.....	52
3.2.2.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları.....	53
3.2.3.	Kılcal Su Geçirirliiliği Deney Sonuçları.....	61

3.2.4.	Betonların Birim Ağırlıkları ve Basınç Dayanımları	62
4.	İRDELEME.....	63
4.1.	Hızlı Klorür Geçirimsiliği.....	63
4.2.	Basınç Altında Su İşleme Derinliği.....	67
4.3.	Kılcal Su Geçirimsiliği	70
4.4.	Basınç Dayanımı	72
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
6.	KAYNAKLAR.....	78
7.	EKLER	84
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

UÇUCU KÜL VE SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN GEÇİRİMLİLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ufuk KANDİL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2014, 83 Sayfa, 15 Sayfa Ek

Betonda dayanıklılığın en az dayanım kadar önemli olduğu, hatta bazı durumlarda öncelikli koşulun dayanıklılık olduğu iyi bilinmektedir. Dayanıklılığın anahtarı geçirimsizliklerdir. Geçirimsizlik betonun boşluk yapısı ile ilgilidir. Bir beton ne kadar boşluksuz ve boşluklar arasındaki bağlantılar ne kadar az ise o derecede geçirimsizdir. Betondaki boşlukların yapısı betonun bileşimi, yerleştirilmesi, sıkılanması ve uygulanan kür ile doğrudan ilgilidir. Özellikle suya maruz betonarme yapılar suyun taşıdığı başta klorür ve sülfat olmak üzere çeşitli zararlı maddelerin etkisindedir. Bu tür maddelerin betonun içine girişi betonun geçirimsizliği arttıkça kolaylaşır. Sonunda betonun hem dayanımı hem de dayanıklılığı azalır. Diğer bir ifadeyle yapının servis ömrü kısalmaktadır. Betonun geçirimsizliğini azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri betonda mineral katkı maddesi kullanmaktır. Mineral katkı maddeleri çimentoya göre genellikle daha ince öğütüldüklerinden betonun geçirimsizliğini azaltırlar.

Çalışmada uçucu kül ve silis dumanı ikamesinin betonun geçirimsizlik özelliğine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda üretilen betonlarda hızlı klorür geçirimsizliği deneyi, basınçlı su işleme derinliği tayini deneyi, kılcal su emme deneyi ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mineral katkının çimento ile ikamesi arttıkça geçirimsizliğin arttığını göstermektedir. Geçirimsizlikte sağlanan iyileştirme itibarıyla silis dumanının uçucu küle göre daha üstün olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Silis dumanı, Klorür geçirimsizliği, Durabilite, Permeabilite

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION ON PERMEABILITY CHARACTERISTICS OF CONCRETES
INCORPORATING FLY ASH AND SILICA FUME

Ufuk KANDİL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2014, 83 Pages, 15 Pages Appendix

It is fairly well known that concrete durability is as much important as strength; moreover, it is primary concern in some circumstances. Permeability is the key to the durability. On the other hand, permeability is closely related to the voids system of the concrete. Concrete with fewer amounts of voids and disconnected with one another, it is said to be impermeable. The structure of voids in concrete is straightly related to the mix proportions, placing, compaction, and curing procedures of concrete. Concrete structures, particularly those subjected to waters, are at the risk of various harmful agents such as chlorides and sulfates transported through the concrete via water. The permeation of such agents in concrete gets easy as the permeability of concrete increases. At the end, both the strength and the durability of concrete diminish. In other words, the service life of the concrete structure shortens. Mineral additives are used most commonly in concrete to suppress the permeability. Such materials decrease the permeability of concrete since they are generally ground finer than cement.

In the study, concrete produced with fly ash and silica fume at various replacing ratios by cement to investigate their effects on the permeability of concrete. In this scope, rapid chloride permeability test, pressurized water depth test, capillarity test and compressive strength test on concrete were performed. The results obtained indicate that the permeability of concrete decreases as the mineral replacement ratios increase. With respect to the improvement in permeability, silica fume is found to be superior to fly ash.

Keywords: Fly ash, Silica fume, Chloride permeability, Durability, Permeability

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Porozite ve permeabilite arasındaki ilişkinin gösterimi	21
Şekil 1.2.	Betonun fiziksel bozulma nedenleri	23
Şekil 1.3.	Betonun kimyasal bozulma nedenleri	23
Şekil 1.4.	Betonda kılcal su emme miktarının belirlenmesi	24
Şekil 1.5.	Basınçlı su işleme derinliği deneyinin şematik gösterimi	25
Şekil 1.6.	Betona gömülü çelik donatının korozyonunun şematik gösterimi.....	27
Şekil 1.7.	Betonarme yapılarda ilerlemiş donatı korozyonu	28
Şekil 1.8.	Klorlu ortamlarda korozyon gelişiminin şematik gösterimi.....	31
Şekil 1.9.	Hızlı klorür geçirimsizliği deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.1.	Karışım agregasına ilişkin granülometri eğrisi	36
Şekil 2.2.	Üretilen beton numune boyutları.....	40
Şekil 2.3.	Bir dökümde üretilen beton numuneler (kalıpları içinde).....	40
Şekil 2.4.	Beton üretimlerinde kullanılan mikser	41
Şekil 2.5.	Vibrasyon uygulaması için kullanılan sarsma tablası	41
Şekil 2.6.	Çökme değerinin ölçülmesi.....	42
Şekil 2.7.	Hızlı klorür geçirimsizliği test düzeneği	43
Şekil 2.8.	Deney düzeneğine ait hücrelerin iç tarafının görünümü	44
Şekil 2.9.	Numunelerin deneye hazırlık aşaması.....	44
Şekil 2.10.	Numunelerin deneye hazır hale getirilmesi.....	45
Şekil 2.11.	Basınçlı su tatbik edilecek yüzeylerin deney öncesi (sol) ve deney sonrası (sağ) görünümleri	46
Şekil 2.12.	Basınçlı su işleme derinliği tayini deneyi cihazı	47
Şekil 2.13.	Basınçlı su işleme derinliği hücresi.....	47
Şekil 2.14.	Numuneleri yarma işlemi ve yarılmış numune yüzeyinin görünümü	48
Şekil 2.15.	Kılcal su geçirimsizliği deney düzeneği.....	49
Şekil 2.16.	Basınç dayanımı test cihazı	50
Şekil 2.17.	Birim ağırlık için kullanılan terazi	50
Şekil 3.1.	B290Ş kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	54

Şekil 3.2.	B290UK10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	54
Şekil 3.3.	B290UK20 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	55
Şekil 3.4.	B290UK30 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	55
Şekil 3.5.	B290SD5 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	56
Şekil 3.6.	B290SD10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	56
Şekil 3.7.	B290SD15 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	57
Şekil 3.8.	B340Ş kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	57
Şekil 3.9.	B340UK10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	58
Şekil 3.10.	B340UK20 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	58
Şekil 3.11.	B340UK30 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	59
Şekil 3.12.	B340SD5 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	59
Şekil 3.13.	B340SD10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	60
Şekil 3.14.	B340SD15 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili	60
Şekil 4.1.	Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için uçucu kül ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri	63
Şekil 4.2.	Toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 için uçucu kül ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri	64
Şekil 4.3.	Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için silis dumanı ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri	65
Şekil 4.4.	Toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 için silis dumanı ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri	66
Şekil 4.5.	Uçucu kül ikameli betonlarda maksimum su işleme derinlikleri	68
Şekil 4.6.	Silis dumanı ikameli betonlarda maksimum su işleme derinlikleri.....	69
Şekil 4.7.	Uçucu kül ikameli betonlar için ölçülen kılcallık katsayıları.....	70
Şekil 4.8.	Silis dumanı ikameli betonlar için ölçülen kılcallık katsayıları	71
Şekil 4.9.	Uçucu kül ikameli betonlar üzerinde ölçülen basınç dayanımları	72
Şekil 4.10.	Silis dumanı ikameli betonlar üzerinde ölçülen basınç dayanımları.....	73
Ek Şekil 1.	B290Ş kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	92
Ek Şekil 2.	B290UK10 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	92
Ek Şekil 3.	B290UK20 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	93
Ek Şekil 4.	B290UK30 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	93
Ek Şekil 5.	B290SD5 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	94
Ek Şekil 6.	B290SD10 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	94

Ek Şekil 7. B290SD15 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	95
Ek Şekil 8. B340Ş kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	95
Ek Şekil 9. B340UK10 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	96
Ek Şekil 10. B340UK20 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	96
Ek Şekil 11. B340UK30 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	97
Ek Şekil 12. B340SD5 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	97
Ek Şekil 13. B340SD10 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	98
Ek Şekil 14. B340SD15 kodlu betonun (Q/A) – (t ^{0.5}) grafiği	98

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Karma suyunda bulunabilecek yabancı maddelerin sınır değerleri	6
Tablo 2.1.	Agrega özgül ağırlıkları	35
Tablo 2.2.	Agregaların su emme ve nem içerikleri	35
Tablo 2.3.	Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler	37
Tablo 2.4.	Uçucu küle ait bazı özellikler	37
Tablo 2.5.	Beton karışımları	39
Tablo 3.1.	Çökme değerleri ve akışkanlaştırıcı katkı oranları	51
Tablo 3.2.	ASTM C 1202'ye göre klorür geçirimsizlik sınıflaması	52
Tablo 3.3.	Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları (28 günlük)	52
Tablo 3.4.	Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları (90 günlük)	53
Tablo 3.5.	Betonda su işleme derinliğinin değerlendirilmesine ilişkin kriterler	53
Tablo 3.6.	Basınçlı su geçirimsizliği deneyine ilişkin sonuçlar	61
Tablo 3.7.	Beton karışımları için ölçülen kılcallık katsayıları	62
Tablo 3.8.	Basınç dayanımı sonuçları ve sertleşmiş birim ağırlıklar	62
Ek Tablo 1.	B290Ş kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	84
Ek Tablo 2.	B290UK10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	85
Ek Tablo 3.	B290UK20 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	85
Ek Tablo 4.	B290UK30 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	86
Ek Tablo 5.	B290SD5 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	86
Ek Tablo 6.	B290SD10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	87
Ek Tablo 7.	B290SD15 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	87
Ek Tablo 8.	B340Ş kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	88
Ek Tablo 9.	B340UK10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	88
Ek Tablo 10.	B340UK20 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	89
Ek Tablo 11.	B340UK30 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	89
Ek Tablo 12.	B340SD5 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	90
Ek Tablo 13.	B340SD10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	90
Ek Tablo 14.	B340SD15 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	91

SEMBOLLER DİZİNİ

C	: Coulomb
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
MSİD	: Maksimum Su İşleme Derinliği
OSİD	: Ortalama Su İşleme Derinliği
SD	: Silis Dumanı
S/B	: Su/Bağlayıcı
UK	: Uçucu Kül
ZOKGB:	Zararlı Ortamlara Karşı Geçirimsiz Beton

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanların temel ihtiyaçlarından biri barınmadır. Bu nedenle insanlar ilkel zamanlardan günümüze değin doğada var olan malzemeleri kullanarak ve bunları geliştirerek yaşayabilecekleri alanlar inşa etmişlerdir. Yapılan araştırmalar ve deneme yanımlar sonucunda inşa yapım teknikleri ve yapı inşasında kullanılan malzemeler gelişmiş ve kullanılma amacına göre gereken yapı malzemeleri çeşitlenmiştir. Tüm bu gelişmelere rağmen iyi bir planlama ve işçilik yapının kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. İnşaat sektörünün en önemli malzemeleri beton ve üretiminde kullanılan çimentodur.

Dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artması sonucu üretim ve tüketim miktarları da hızla artmaktadır. Bu nedenle üretimde maliyet düşürülmeye çalışılmakta ve bazı üretimlerden oluşan atık maddeler başka üretimlerde kullanılarak hem malzeme israfı önlenmekte, hem enerjiden tasarruf edilmekte hem de kullanılan atık malzeme yeni üretilen malzemenin özelliklerini geliştirebilmektedir.

Yeryüzündeki kaynakların azalması ve sera gazlarının etkisinin her geçen gün daha belirgin bir şekilde ortaya çıkması nedeniyle beton üretimi için tüketilen enerji, ortaya çıkan CO₂ gazı ve diğer çevresel etkileri minimize etmek artan bir öneme sahip olmaktadır. Dolayısıyla, beton karışımı tasarımında yaşam döngüsü ve sürdürülebilir mühendislik yaklaşımları önem kazanmaktadır. Betonun durabilitesini olabildiğince iyileştirmek, malzemenin korunması, atıkların ve puzolanik malzemelerin betonda kullanılması ve betonun geri dönüşümü bu yaklaşımlara örnek olarak verilebilir [1]. Çimento üretimi nedeniyle çevreye yayılan zararlı gazlar dünya çapında tüm endüstriyel kaynaklardan yayılan gazların %2.5'ini oluşturmaktadır. Bu çevresel etkiyi azaltmanın etkili yollarından birisi de çimento ile ikame puzolanik özellikli mineral katkı kullanmaktır [2]. Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan fakat ince öğütülerek kullanıldığında sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiğinde bağlayıcılık özelliği gösteren silikatlı ve alüminatlı malzemelerdir [3]. Günümüzde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç çeltiği külü ve metakaolin gibi atık ve bağlayıcı destekleyici malzemeler portland çimentosu ile ikame edilerek yaygın bir biçimde

kullanılmaktadır. Bu tip malzemeler betonun durabilitesini iyileştirir, kütle betonlarında termal çatlakları azaltır, çimento üretiminde daha az enerji tüketimine ve daha az CO₂ salınımına olanak sağlar. Kırılan betondan elde edilen agregaların kullanımı da geri dönüşüm ve hammaddelerin korunmasına örnek olarak verilebilir [1].

Yapı elemanlarının ve malzemelerin işlevlerini bozmadan özelliklerini uzun yıllar boyunca koruyabilmesine dayanıklılık (durabilite, kalıcılık) denir [4]. Yüksek dayanım dayanıklılığın da iyi olacağı anlamına gelmez ve betonun dayanıklılığı bazı durumlarda dayanımdan daha önemli olabilir [5]. Dayanıklılık beton içerisindeki boşluklarla doğrudan ilişkilidir. Bu boşluklarının büyüklüğü, miktarı, matris içindeki dağılımı ve oluşan çatlaklar doğrudan betonun durabilitesini etkilemektedir. Genellikle betonun sahip olduğu boşluk oranı ne kadar fazla ise çevresel etkilerin betona zarar vermesi o nispette artar. Betonun durabilitesinin kötü olması sonucu betonda oluşan başlıca sorunlar; donatı korozyonu, sülfat etkisi, soğuk iklimli yerlerde donma-çözülme etkisi, alkali agrega reaksiyonu olarak sayılabilir.

Betonun durabilitesi ile ilgili araştırmalarda, betonarme elemanlarda klorür etkisi genellikle en fazla gözlemlenen ve değerlendirilen etkidir. Klorür, kapiler su emme ile hidrostatik basınç ve/veya iyonların difüzyonu yoluyla beton içerisine girebilir. Klorür genellikle çimento matrisine kendi kendine zarar vermemesine karşın, depasivasyon işlemi ile betona gömülü donatının korozyonunu hızlandırır, elemanın yük taşıma kapasitesini düşürür ve potansiyel olarak yapının göçmesine zemin hazırlayabilir [6]. Klorürün beton bünyesine üretim aşamasında girmesi ile sonradan girmesi arasında büyük fark vardır. Üretim aşamasında betona giren klorürün bir kısmı hidrasyon sırasında klinker bileşenlerinden C₃A ile birleşerek kimyasal olarak bağlanır. Betona sonradan giren klorür kimyasal olarak bağlı olmadığı için donatı korozyonu açısından daha tehlikelidir. Mineral katkı kullanımı genellikle betonu daha geçirimsiz hale getirmektedir. Fakat başlangıçta beton içerisinde bulunan klorür iyonlarına karşı bu tip katkıların nasıl etki ettiği tam olarak açıklanamamıştır [7].

Ülkemizde de donatı korozyonu yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur. Çimento ve suyun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)₂ betonun pH derecesinin yaklaşık 13 olmasını sağlar. Fakat herhangi bir sebepten dolayı bu değer azalması sonucu donatıyı koruyan pasivasyon tabakası kaybolur. pH değerinin azalması karbonatlaşma ve/veya klorür etkisi sonucunda oluşabilir [8].

1.2. Amaç ve Kapsam

İnşaat sektörü ihtiyaçlar bakımından sürekli olarak yenilenme ve değişme sürecindedir. Kısıtlı kaynaklar ve artan maliyetler karşısında ihtiyaçların karşılanabilmesi için yeni yöntem ve kaynakların araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle mevcut hammaddelerin rasyonel bir şekilde kullanımı önem taşımaktadır.

Yapılarda beklenen en önemli özellikler; dayanım, dayanıklılık, ekonomi, işlevsellik ve estetikdir. Bu faktörler birbirleriyle ilişkili olup bu hususların sağlanması ile mühendislik açısından eksiksiz bir çözümden bahsedilebilir. Fakat yakın tarihe kadar dünyada olduğu gibi ülkemizde de dayanıklılık (durabilite) kavramına yeterince önem verilmemiştir. Ülkemizde yaşanan depremler, doğal afetler, çevresel etkilerden dolayı betonda oluşan büyük zararlar gibi hususlar sonrasında ancak dayanıklılık veya performans kavramı hatırlanmıştır.

Yapıda performans için yüksek dayanım gerekli fakat tek faktör olarak görülemez. Dayanımın yanında dayanıklılık çok önem arz etmektedir. Dayanıklılığı iyileştirmede çoğunlukla başvurulan yöntemlerden biri uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel mineral atıklar veya puzolan gibi doğal malzemeleri çimento ile ikame veya çimentoya ek olarak beton üretiminde kullanmaktır. Bu tür mineral katkıları çimentoya nazaran ince öğütüldükleri için betonun geçirimsizliğini oldukça düşürmektedir. Geçirimsiz betona dış ortamda mevcut sülfat, klorür gibi zararlı maddelerin girişi zorlaşacağı için betonarme yapıların performansları/dayanıklılıkları iyileşmiş olur. Betonda bu anlamda sağlanacak iyileşme yapıların ömrünü uzatır.

Bu çalışmada amaç, çimento ile ikame edilerek beton üretiminde kullanılan uçucu kül ve silis dumanının betonun başta klorür geçirimsizliği, su geçirimsizliği ve dayanımına etkisini araştırmaktır. Bu kapsamda uçucu kül ve silis dumanı mineral katkıları, çimento ile belirli oranlarda ikame edilerek betonlar üretilmiştir. Bu betonlara 28 ve 90 gün standart su kuru uygulandıktan sonra hızlı klorür geçirimsizliği, 28 günlük standart su kuru üzerinden sonra ise basınç altında su işleme derinliği tayini, kılcal su emme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

1.3. Beton ve Özellikleri

Beton; agrega, çimento, su ve bu malzemelere ek olarak gereksinime göre çeşitli mineral ve/veya kimyasal katkıların belirli oranlarda homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir. Beton, üretimi sırasında kolay şekil verilebilen, sertleştikten sonra yüksek mukavemet değerine sahip olduğundan kullanımı çok yaygın olan bir yapı malzemesidir. Betonda çekme gerilmesi oluşması istenmez, bu nedenle betonda donatı kullanılarak oluşturulan betonarme elemanlar sayesinde betonun çekme gerilmesine maruz kalması önlenir. Betonu diğer yapı malzemelerine göre üstün kılan önemli bir özellik plastik kıvamı sayesinde kolayca şekil verilebilmesidir [9].

Beton üretiminde çeşitli çimento tiplerinden kullanılmak istenen yere göre amaca en uygun olan seçilir. Ayrıca çeşitli büyüklükte ve özelliklerde agrega, karışım suyu ve katkı maddelerinden daha önce sahip olunan tecrübe de kullanılarak en uygun olan seçim yapılmalıdır. Bunun için inşaat mühendisi beton üretiminin her aşamasında bulunur ve gerekli olan tüm taze ve sertleşmiş beton deneylerini gerçekleştirir [10].

Betonun dayanım ve dayanıklılığına ilişkin olarak performansının ortaya konulması için yeterli kür uygulanması son derece önemlidir. Eğer beton bileşiminde uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı maddeleri kullanılmış ise dökümden hemen sonra özellikle sıcak ve kuru ortamlarda yapılan dökümde kür olayı daha da önemli olabilmektedir [11].

Yüksek dayanım veya yüksek dayanıklılığı ile yüksek performanslı beton sınıfına giren betonlar gün geçtikçe normal beton ile yer değiştirmektedir [12]. Ekonomik, teknik ve çevresel nedenlerden dolayı betonda kullanılan mineral katkı maddeleri modern beton yapılarında çok sık kullanılır hale gelmiştir. Betonun dayanımını iyileştirmede, basınç dayanımı, boşluk büyüklüğü ve dağılımı ile betonun dayanıklılığı üzerine standart kür koşulları dikkate alınarak birçok çalışma ortaya konulmuştur [13]. Ayrıca 20. yy. boyunca çimento ve beton endüstrisinde mineral katkı kullanımı artış göstermiştir. Bu artışın devam etmesi beklenmektedir. Çimento ve betona olan ihtiyaç fazlalığı nedeniyle betonda farklı malzemelerin çimento ile ikame edilerek kullanımı gitgide artış göstermektedir [14].

1.3.1. Agregalar

Agregalar hacimsel olarak betonun yaklaşık %60-70'ini oluşturur. Agreganın özellikleri taze betonda işlenebilirliği sertleşmiş betonda durabiliteyi, basınç dayanımını, termal özellikleri ve yoğunluğu önemli derecede etkiler [15]. Türk standartlarının tanımlamasına göre 4 mm göz açıklıklı elekten geçen agrega ince agrega, bu elek üzerinde kalan agrega iri agrega olarak bilinmektedir [16]. Agregaların betonda kullanımı çimento hamurunun büzülmesini (rötre) sınırlandırarak betonun hacim sabitliğini sağlar [17].

Agregaların ucuz olması, kolay temin edilebilmesi, aşınmaya ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olması, hacimsel değişimlerinin neredeyse olmaması gibi özellikleri nedeniyle betonda kullanımı vazgeçilmez olmaktadır [18].

1.3.2. Çimento

Portland çimentosu; kireç, alümin, demir oksit ve silis birleşimli hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp yüksek fırında pişirilmeleri sonucu elde edilen klinkerin ince öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır [8]. Portland çimentosunun ilkel maddeleri kalker (kireçtaşı, marn) ve kildir. Bu malzemeler ince bir şekilde öğütülerek 1350⁰C-1400⁰C sıcaklıklarda döner fırınlarda pişirilir. Kalkerin ayrışması ile CaO, kilin ayrışması ile silis (SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) oluşur. Bu bileşenler yüksek sıcaklıkta aralarında birleşerek silikatları ve alüminatları oluşturur [19]. Bunların en önemlileri şunlardır.

- Dikalsiyum silikat (C ₂ S)	2CaO.SiO ₂
- Trikalsiyum silikat (C ₃ S)	3CaO.SiO ₂
- Trikalsiyum alüminat (C ₃ A)	3CaO.Al ₂ O ₃
- Tetrakalsiyum alumino-ferrit (C ₄ AF)	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃

Bu silikat ve alüminatlar Portland çimentosunda yaklaşık olarak sırasıyla C₂S %16.6, C₃S %54.1, C₃A %10.8 ve C₄AF %9.1 oranlarında bulunur [8].

TS EN 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) beş ana sınıfa ayırmaktadır. Bunlar ismen sırasıyla,

CEM I: Portland Çimentosu

CEM II: Portland Kompoze Çimento

CEM III: Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento

CEM IV: Puzolanik Çimento

CEM V: Kompoze Çimento şeklinde verilebilir.

Bu çimentolar 27 farklı alt sınıfa ayrılmıştır. Ayrıca CEM I tip çimento için 32.5, 42.5 ve 52.5 olmak üzere üç farklı dayanım sınıfı tanımlanmaktadır [20].

1.3.3. Su

Betonda kullanılan suyun beton yapımı için uygun olan kalitede olması gerekir. Bu nedenle karma suyunun TS EN 1008 standardına uygun içerikte olmalıdır. İlgili standarda göre içilebilen sular beton yapımında uygun görülmemekte olup içilebilir su için deney yapılmasına gerek olmadığı belirtilmektedir [21].

Tablo 1.1. Karma suyunda bulunabilecek yabancı maddelerin sınır değerleri [22].

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

1.3.4. Kimyasal Katkılar

Beton katkı maddeleri karışımdan önce veya karışım esnasında betona çok az miktarlarda ilave edilen organik veya inorganik maddelerdir [23].

Kimyasal katkı mineral katkılara kıyasla çok daha az miktarda (çimento ağırlığının % 0.1-5' arası) betonda kullanılırlar [24]. Kimyasal katkı maddeleri önerilenden daha fazla miktarlarda kullanılmaları halinde betonun çökmesi ve stabilitesi üzerinde olumsuz etki yapabilmektedir [25].

Kimyasal katkı maddeleri ilgili standart TS EN 934-2`de aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır [24].

1. Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları
2. Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkıları
3. Su tutucu katkıları
4. Hava sürükleyici katkıları
5. Priz hızlandırıcı katkıları
6. Sertleşmeyi hızlandırıcı katkıları
7. Priz geciktirici katkıları
8. Su geçirimsizlik katkıları
9. Priz geciktirici/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları
10. Priz geciktirici/yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkıları
11. Priz hızlandırıcı/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları

Kimyasal katkıları çalışma mekanizmalarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

- Su azaltıcı katkı maddeleri: Kimyasal yapıları linyosülfonatlar, hidroksikarboksilik asitler ve karbonhidratlardır. Su gereksinimini %6.5'ten daha yüksek oranda azaltabilen bu katkıları basınç dayanımını %10'dan fazla artırabilmektedir.
- Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri: Kimyasal yapıları itibariyle modifiye linyosülfonatlar, akrilik kopolimerler, amino aromatik sülfoneik asit, sülfone melamin formaldehit polikondanse katkılarıdır. Su gereksinimini %12'den daha yüksek oranda artırabilen bu katkıları betonun basınç dayanımını %15'den fazla artırabilmektedir.
- Priz hızlandırıcı katkıları: Ana bileşimleri kalsiyum nitrat ve nitritler, tiosülfatlar formatlarıdır. Genellikle betonun donma riskini azaltmak için kullanılırlar.

- Priz geciktirici katkıları: Ana bileşimleri glukonat, salisik asit, kalsiyum linyosülfonatlardır. Sıcak havalarda ve geç priz almasını gerektirecek durumlarda kullanılırlar.
- Hava sürükleyici katkıları: Ana bileşimleri ağaç reçine tuzları, yağlı asit tuzları ve silfene hidrokarbonik asit tuzlarıdır. Donma-çözülme direncini artırıcı, su geçirimsizliğini azaltıcı etkileri vardır [26].

1.3.5. Mineral Katkı Maddeleri (Puzolanlar)

ASTM C 615'e [27] göre kendi kendine bağlayıcı özelliği çok az olan ya da hiç olmayan fakat uygun şartlar altında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği kazanan silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Puzolanların betonda kullanılması ile betonun boşluk yapısı ve geçirimsizliğinde azalma olmaktadır. Bu da betonun dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir. Geçirimsizlik için önemli parametrelerden biri olan agrega-çimento ara yüzeyini ve çimento hamurundaki boşlukları doldurmak için uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanlar kullanılmaktadır [27].

Geleneksel beton içinde kullanılan malzemelerin en maliyetlisi Portland çimentosudur. Buna rağmen mineral katkıların çoğu daha az enerji gerektiren endüstriyel ve doğal ürünlerdir. Portland çimentosunun bu katkılarla yer değiştirmesi ile önemli bir tasarruf elde edilir. Ayrıca Portland çimentosu üretimi sırasında çevreye büyük miktarda zararlı gazlar salınmaktadır. Puzolanların yaygın olarak kullanımına gerekçe oluşturan ikinci faktör budur [28].

İyi bir işlenebilirlik yüksek kalitede beton üretmek için önemli bir özelliktir. Çünkü işlenebilirliği kötü olan bir betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri de kötü olmaktadır. Buna rağmen uygulamada genellikle uzun teslimat sürelerinde slump kaybı göz ardı edilmektedir. Betonda mineral katkı kullanım oranının artmasıyla slump kaybında azalma görülebilir [29].

Puzolanik malzemelerin yeterli bağlayıcılık özelliği göstermesi için aşağıda verilen şartları sağlamış olması gerekmektedir:

- Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlarda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının en az %70 olması istenmektedir.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda olmalı veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır.

- Amorf bir yapıya sahip olmalıdır. Kristal olmayan bir yapıda olmalıdır [30].

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay olarak sınıflandırılırlar:

- Doğal puzolanlar: Volkanik cam, volkanik tuf, kalsine kil ve şist, opalin ve silika
- Yapay puzolanlar: Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü [31-33].

1.3.5.1. Uçucu Kül

Kömürle çalışan termik santrallerde baca gazları ile taşınan ve mekanik-elektrostatik yöntemlerle biriktirilerek çevreye yayılması engellenen atık malzemelere uçucu kül denir. Dünyada açığa çıkan yaklaşık 600 milyon ton uçucu külün 13 milyon tonu Türkiye kaynaklıdır. Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine göre farklılık gösterir [34].

Uçucu küllerin yaygın olarak kullanıldığı alanların başında inşaat sektörü bulunmaktadır. Uçucu küller inşaat sektöründe uçucu küllü çimento, beton, tuğla, hafif agrega üretimi ve zemin stabilizasyonu ile dolgu işlerinde kullanılmasına yönelik çalışmalarda kullanılmaktadır. Bunlara ilaveten uçucu kül absorban olarak atık suların arıtılmasında, asidik karakterli toprağın ıslahında, döküm ve metal sanayisinde, sondaj işlerinde ve karlanma ile buzlanmanın önlenmesine yönelik uygulamalarda da kullanılmaktadır [35].

Türkiye’de uçucu kül kullanımı ile yapılan ilk araştırma ve çalışmalar Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 1968 yılında yapılmıştır. DSİ tarafından Tunçbilek termik santralinden temin edilen uçucu kül üzerinde yapılan araştırmalardan sonra bu uçucu kül Gökçekaya ve Porsuk barajı inşaatlarında kullanılmıştır. Aynı yıllarda Türkiye Cumhuriyeti Karayolları (TCK) laboratuvarlarında yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen olumlu sonuçlar ile 1966 yılında 4. Bölge Pazar Köprüsü inşaatında uçucu küllü beton kullanılmıştır. Çimento üretiminde ilk olarak uçucu külün kullanımı ise Afyon ve Balıkesir çimento fabrikalarında Soma ve Seyitömer termik santrallerinden elde edilen uçucu külün kullanımı ile 1970 yılında gerçekleşmiştir [10].

Uçucu küller beton teknolojisinde ya çimento ile betona katılarak ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri de olduğundan çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. Özgül yüzeyleri büyük olduğundan bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlar. Birim ağırlıkları düşük olduğu için

betonun birim ağırlığını da düşürürler. Ayrıca uçucu kül kullanımı ile hidrasyon ısı düşmekte ve buna bağlı olarak betonda termik rötre ve çatlama engellenmektedir. Dolayısıyla kütle betonları için uygundur [36].

Uçucu küllerin kimyasal bileşimi yakılan kömürün yapısı, jeolojik kökeni ve işlem koşullarına bağlıdır. Uçucu küllerin kimyasal yapısı temel olarak silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3)'den oluşmaktadır. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri kimyasal kompozisyonlarından daha çok mineralojik özelliklerine bağlıdır. Yüksek kireçli uçucu küllerin camsı ve kristalize fazları, bu tip uçucu küllere puzolanik özelliklerinin yanı sıra kendiliğinden bağlayıcı olma özelliğini de sağlamaktadır [10].

Uçucu küllerin boyutu 0.5-100 μm arasında değişmektedir. Camsı küresel ve düzensiz şekilli taneciklerdir. Şekil ve büyüklük dağılımı taze betonun işlenebilirlik özelliğini oldukça etkilemektedir. Ayrıca uçucu külün inceliği puzolanik aktivite hızını da etkilemektedir. Yoğunlukları ortalama olarak 2400 kg/m^3 'tür. Fakat yoğunluk değerinin beton özellikleri üzerindeki etkisi çok azdır. Renkleri yakılan kömürün cinsine göre değişiklik göstermektedir. Genellikle gri renkte olmalarına rağmen yanmamış kömür parçacıklarından dolayı koyu renkte alabilirler. İncelikleri arttıkça su içerikleri de artmaktadır [10].

Uçucu külleri sınıflandırmak için kimyasal bileşim yüzdesi esas alınır. TS EN 197-1 ve ASTM C 618 standartlarına göre uçucu küllerin sınıflandırılması aşağıda belirtildiği gibidir.

TS EN 197-1 [20] standardına göre:

- V sınıfı uçucu küller: Genellikle puzolanik özelliğe sahip küresel taneciklerden oluşan ve çoğunluk olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan küllerdir. Bu tip uçucu küllerin reaktif silis miktarı %25'den fazladır.
- W sınıfı uçucu küller: Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan çoğunluk olarak reaktif kireç CaO , reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan küllerdir. Bu tip uçucu küllerin reaktif kireç miktarı %10'dan fazla, reaktif silis miktarı da %25'den fazladır.

ASTM C 618 [27] standardına göre:

- F sınıfı uçucu küller: Bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70'den fazla olan uçucu küllerdir. Ayrıca bu sınıfa giren uçucu küllerin CaO miktarı %10'un altındadır. Bu nedenle düşük kireçli olarak da adlandırılır. Bu tip uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir.

- C sınıfı uçucu küller: Linyit ve yarı bitümlü kömürden elde edilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan uçucu küllerdir. Ayrıca bu sınıftaki uçucu küllerde CaO miktarı %10'dan fazla olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. Puzolanik özellik ve bağlayıcı özelliğe sahiptirler.

Uçucu kül normal ve hafif betonlarda hem de hazır beton uygulamalarında katkı olarak veya çimento ile ikame olarak kullanılmaktadır.

1.3.5.2. Silis Dumanı

Silis dumanı metal silisyum ve silisyum alaşımlarının üretilmesi sırasında elektrik fırınlarındaki indirgenme reaksiyonları sonucu oluşan baca gazlarından elde edilir. Yüksek puzolanik karakter gösterir. İçeriğinde %90-95 miktarında amorf silikon dioksit vardır. Silis dumanı agrega çimento hamuru ara yüzeyi kusurlarını azaltır. Bu nedenle betonun dayanım ve dayanıklılığını iyileştirir. Silis dumanı kullanımı genellikle betonun su gereksinimini artırır. Bu nedenle uçucu kül kullanımı ile birlikte süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması önerilmektedir. Özgül ağırlıkları $2200-2300 \text{ kg/m}^3$ arası olup siyah ve beyaz renkte olmak üzere değişen bir renk aralığına sahiptirler [37].

Silis dumanı ticari amaçlı aşağıda verildiği gibi birkaç şekilde üretilerek piyasaya sunulmaktadır:

- Yoğunlaştırılmış silis dumanı
- Yoğunlaştırılmış veya sıkılaştırılmış silis dumanı
- Sulandırılmış silis dumanı şeklindedir.

Silis dumanının tane boyutları $0.1-0.2 \mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Çimentodan yaklaşık olarak 100 kat daha incedir. Beton katkı maddesi olarak kullanılan silis dumanının özgül yüzey alanı yaklaşık olarak $20,000 \text{ m}^2/\text{kg}$ civarındadır [10].

Silis dumanı, portland çimentosu klinkeri ve az miktarda alçı taşı ile öğütülerek silis dumanlı çimento olarak kullanılabilir ancak daha çok katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Silis dumanı çimento ile genellikle %10 ikame edilerek kullanılır. Silis dumanı çok yüksek oranda SiO_2 içerdiğinden betonun nihai dayanım değerini oldukça artırır. Bunun yanında taze betonda terlemeyi, ayrışmayı, hidrasyon ısısını azaltır. Sertleşmiş betonda ise su geçirimsizliğini, alkali silika reaksiyonunu, çevreden beton içine sızan klorür ve sülfat gibi zararlılara karşı geçirimsizliği azaltır [38].

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri iri çimento taneleri arasına girerek buradaki suyu dışarı iter ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili olur. Olumlu olan bu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin büyük olan yüzey alanı sebebiyle betonun su ihtiyacı artar. Bu durum da kıvamı olumsuz etkiler. Araştırmalara göre çimentonun %5'i kadar katılan silis dumanı su ihtiyacını fazla değiştirmemekle birlikte daha büyük miktarlarda ise su ihtiyacı artmaktadır. Benzer şekilde, çimentonun %7.5'dan fazlası yerine silis dumanı katıldığında hamurun akma sınırı ve viskozitesinin arttığı daha az miktarlarda ise azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan araştırmalara göre araştırmacılar silis dumanı katkısının dayanım ve dayanıklılık üzerindeki olumlu etkisini daha çok agrega-çimento hamuru arayüzeyini kuvvetlendirmesine bağlamaktadır. Bazı araştırmacılara göre silis dumanı çimentonun %15'i yerine katıldığında ortalama her çimento tanesine karşın iki milyon silis dumanı tanesi girmektedir. Çok ince taneli olan silis dumanı taneleri arayüzeydeki boşlukları doldurmakta ve terlemeyi azalttığı için agrega taneleri altında daha az su toplanmasına yol açmaktadır. Bu nedenle daha yapışkan hale gelen hamur ile agrega taneleri arasındaki fiziksel aderans artmaktadır. Ayrıca ince taneler kalsiyum hidroksit kristalleri içinde daha fazla sayıda çekirdeklenme noktası oluşturduklarından arayüzeydeki iri kalsiyum hidroksit kristalleri yerine daha küçükleri oluşmaktadır.

Cıvalı porozimetre ile yapılan deneylerde silis dumanının sertleşmiş çimento hamuru ve harçlarında iri gözenekleri azaltarak daha fazla sayıda küçük gözenek oluşturduğunu ve oluşan bu yeni gözeneklerin daha homojen olarak dağıldığını göstermiştir. Fakat bu durum içyapıdaki toplam gözenekliliği değiştirmemiştir. Homojen yapı küçük gözeneklerdeki suyun daha yavaş ve kontrollü olarak buharlaşması ile ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle katkısız betonlara göre silis dumanı katkılı betonların su emmesi de azalmaktadır [39].

1.3.5.3. Yüksek Fırın Cürufu

Demir-çelik üretim tesislerindeki yüksek fırınlarda demir oksit (maden filizi, peletler, sinter), akıcılık düzenleyiciler (kalker, dolomit), ve yakıt (kok kömürü) kullanılır. Yüksek fırın cürufu, bu fırının kullanılmasıyla işlem sonrası fırından elde edilen fırının alt kısmında toplanan erimiş demirin üzerinde yüzen kalıntıdır. Yüksek fırın cürufunun içeriği yüksek fırına beslenen maden filizi, akıcı taş ve kottaki saflık derecesine bağlıdır. Genelde

yüksek fırın cürufunun %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden oluşur [40].

Cüruf katkılı betonun dayanımı; cürufun inceliğine, karışım içerisindeki cüruf/çimento oranına ve cürufun aktivite endeksine bağlıdır. İnce öğütülmüş olarak betonda kullanıldığında işlenebilirliğin arttığı, daha az su absorbe ettiği ve terlemeyi azalttığı görülmektedir [41].

Granüle yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliği belirli bir değere kadar CaO/SiO₂ oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. CaO miktarının çok yüksek olması ile puzolanik özellikte azalma olmaktadır. Türkiye'de çelik üretiminden 300 bin ton civarı cüruf atık olarak ortaya çıkmaktadır [10].

1.4. Literatür Özeti

Bu bölümde uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak üretilen betonlar ile ilgili klorür geçirimsizliği ve bazı diğer durabilite ve dayanım ile ilgili gerçekleştirilen önceki çalışmalardan birkaçı ele alınacaktır.

Ramezianpor [11], betonda uçucu kül, silis dumanı ve cüruf kullanarak 0.5 su/bağlayıcı (S/B) oranında ürettiği betonlarda farklı kür sürelerinde farklı oranlarda mineral katkının kullanımını incelemiştir. Çalışmanın sonucunda su kürü süresinin azalması ile yüksek poroziteli geçirgen betonlar elde edildiği görülmüştür. Uçucu kül ve cüruf kullanılan betonlarda yetersiz kürün etkisinin daha belirgin ortaya çıktığı görülmüştür. Cüruf, silis dumanı ve yüksek oranda uçucu kül kullanımının klorür iyonlarına ve permeabiliteye karşı direnci arttırmış olduğu belirlenmiştir.

Gesoğlu vd. [42], 0.44 S/B oranında ve 450 kg/m³ toplam bağlayıcı dozajında uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanarak 22 farklı beton serisi üretmişlerdir. Durabilite özellikleri açısından en iyi etkiyi cüruf ve silis dumanının beraber kullanılması ile edildiğini ifade etmişlerdir.

Berndt [3], geri dönüşümlü agregalar ve normal agregalar ile yaptığı çalışmada katkısız, çimento ile %50 uçucu kül ikameli, %50 yüksek fırın cürufu ikameli, %70 yüksek fırın cürufu ikameli ve %25 uçucu kül + %25 yüksek fırın cürufu ikameli betonlar üretmiş ve %50 cüruf ikameli betonların en iyi performansı verdiğini ifade etmiştir. Diğer taraftan geri dönüşümlü agregalar kullanılan betonun durabilite performansının az bir miktar

azaldığını belirtmektedir. Bunun yanı sıra uçucu kül ile üretilen betonların da benzer şekilde durabilite açısından genellikle zayıf özellikler gösterdiğini göstermiştir.

Kandasamy ve Shahata [43], yüksek oranda kalsiyum içeren uçucu kül ve cüruf katkılarından farklı oranlarda kullanarak betonlar üretmiştir. Sülfatlara karşı cüruf kullanımının oldukça etkili olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca yüksek oranda kalsiyum içeren uçucu kül ve cürufun toplamda %60 ikame oranına ulaştığında betonda oluşan genişlemenin çok azaldığını göstermiştir.

Ahmed vd. [44], 0.48 S/B oranında 7 günlük kür sonunda hızlı klorür geçirimsizliği ve Cape Town Üniversitesi klorür geçirimsizliği deney yöntemini kullanmak üzere iki farklı deney yöntemini karşılaştırmışlardır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ayrı ayrı %25, %50 ve %70 oranlarında çimento ile ikame edilerek betonlar üretmiştir. Her bir seri için ayrıca %10 silis dumanı ikameli betonlar da üretilmiştir. Bu deneyde her seri için silis dumanı eklenen betonlarda klorür geçirimsizliklerinin daha az olduğu görülmüştür. %70 uçucu kül ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliklerinin şahit betondan bile yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum uçucu külün yüksek miktarlarda kullanılmasının klorür geçirimsizliği açısından olumlu sonuçlar vermediğini göstermektedir. Yüksek fırın cürufu kullanılan numunelerde hızlı klorür geçirimsizlikleri daha belirgin şekilde düşmüştür. ASTM C 1202 deney yöntemine göre Cape Town Üniversitesi klorür geçirimsizlik yönteminin daha hızlı ve uygun olduğu ifade edilmektedir.

Uluöz vd. [45], yaptıkları çalışmada CEM I 42.5R, CEMII/B-M 42.5N, CEM IIIA 42.5N çimentoları ile birlikte, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve mikrosilika kullanarak beton karışımları üretmişlerdir. Deneyde 300 kg/m^3 , 330 kg/m^3 ve 360 kg/m^3 olmak üzere üç farklı ayrıca her dozaj için sırasıyla su/bağlayıcı oranlarını 0.55, 0.50 ve 0.45 olarak seçmişlerdir. CEM I çimentosu ile yapılan deneylerde klorür geçirimsizliği yüksek çıkarken cüruf katkılı betonlarda az, kompoze çimentolarda ve silis dumanı kullanılan çimentolarda ise orta değerlerde çıktığı görülmüştür. Basınçlı su işleme derinliğinin su/bağlayıcı oranının 0.55'den 0.5'e düşürülmesi ile yaklaşık 3 mm azaldığı görülmüştür. Ayrıca aynı su/bağlayıcı oranında katkı ilavesi ile veya kullanılan çimento tipinin CEM I 42.5R'den CEMII/B-M 42.5N ve CEM IIIA 42.5N olarak değiştirilmesi ile yine maksimum su işleme derinlikleri yaklaşık 3 mm azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak betonda mineral katkı kullanımının ileriki yaşlarda dayanımı ve geçirimsizlik özelliklerini olumlu etkilediği belirtilmektedir.

Durmuş [46], yaptığı çalışmada C20 ve C30 olarak iki farklı beton sınıfında ayrı ayrı uçucu kül, silis dumanı ve kimyasal katkı kullanımının basınç dayanımı ve su işleme derinliği üzerine etkilerini incelemiştir. Silis dumanı ve uçucu külün betonda kullanımı %10 ikame olacak şekilde belirlenmiştir. Dayanım ve dayanıklılık artışı açısından en iyi etkiyi silis dumanının verdiği ifade edilmektedir.

Türkel ve Tarım [47], farklı çimento tiplerinde ve iki farklı su/çimento oranında (0.485 ve 0.7) çeşitli karışımlar hazırlamışlardır. Hazırladıkları programda deniz suyu etkisini de incelemiştir. 28 gün sonunda en büyük hızlı klorür geçirimsizlik değerleri CEM I 42,5 R tipi çimento ve normal su küründeki deneylerde elde etmişlerdir. Örneğin su/çimento oranı 0.7 olan seride deneyler sonunda elde edilen Coulomb miktarı 10197 iken bu değer CEM II ve CEM III tipi çimentoların kullanıldığı betonlarda oldukça düştüğü görülmüştür.

Dhir ve Jones [48], betonda uçucu kül, silis dumanı, metakaolin kullanımının klorür geçirimsizliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu kül kullanılarak üretilen betonların klorüre karşı dayanıklılıklarının sadece portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara göre 2 ila 4 kat arttığı ifade edilmektedir. Bunun da çimento ile %30 ikame oranının optimum seviye olduğu ifade edilmiştir. İşlenmiş veya ultra ince uçucu külün ise klorür geçirimsizliğini azaltmada çok daha fazla etkili olduğunu söylenmiştir.

Chalee vd. [49], uçucu kül kullanılarak üretilen betonların uzun süreler boyunca (7 yıl) yüksek nem, sıcaklık ve deniz koşulları gibi zorlu koşullardaki özelliklerini incelemiştir. Artan uçucu kül ikame oranının klorür geçirimsizlik katsayısını ve donatı korozyonunu oldukça azalttığını gözlemlemiştir. %25-50 oranında uçucu kül ikameli, 0.6 su/bağlayıcı oranında ve 5 cm pas payı ile betona gömülü donatılarda 7 yıl sonunda bu zorlu koşullarda donatıda pasın oluşmadığı gözlemlenmiştir. S/B oranı 0.45 iken çok daha olumlu sonuçların elde edildiği ifade edilmektedir.

Chindaprasit vd. [50], uçucu kül inceliğinin klorür geçirimsizliği üzerine etkisini incelemiştir. Bunun için orijinal boyutta, %45 ve %10 incelikte uçucu küller çalışma kapsamında kullanılmıştır. ASTM C 1202 hızlı klorür geçirimsizliği deneyi ve NaCl emdirme deney yöntemleri kullanılarak klorür geçirimsizlikleri 28 gün standart kür sonrası araştırılmıştır. Sonuç olarak, yapılan çalışmada Coulomb cinsinden klorür geçirimsizliği sonuçlarının uçucu kül kullanımı ve uçucu külün inceliğinin artmasıyla oldukça azaldığı ifade edilmektedir.

Boğa ve Topçu [51], CEM I 42,5 R tip çimento kullanılarak toplam bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3 olan betonlar üretmişlerdir. Bu üretimlerde uçucu kül çimento ile %0, %15, %30 ve %45 oranlarında ikame edilerek betonda uçucu kül kullanımının klorür geçirimsizliği üzerine etkisini incelemişlerdir. Su ve hava kürü ile 28 ve 56 gün sonrası elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu çalışmada uçucu kül ikamesinin artışı ile hem su kürü hem havada kür için basınç dayanımında dikkate değer bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Klorür iyon geçirimsizlik değerlerinde suda kür gören numunelerin havada kür gören numunelerden daha az geçirimsiz olduğu ve kür süresi arttıkça geçirimsizliğinin de düştüğü gözlemlenmiştir. Çıkan önemli bir sonuç da 56 günlük su küründe %15 uçucu kül ikamesinin bile betonarmede korozyona karşı oldukça direnç sağladığıdır.

Shekarchi vd. [52], silis dumanı katkılı betonları sert deniz koşullarında ve uzun süre sonundaki klorür difüzyonları ile ilgili deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bunun için 0.35, 0.40, 0.45 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında ve her bir su/bağlayıcı oranı için %0, %5, %7.5, %10 ve %12.5 oranlarında silis dumanı çimento ile ikame edilerek üretimler gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak silis dumanı katkılı betonların yalnızca Portland çimentosu içeren betonlara kıyasla klorür geçirimsizlik değerlerinin oldukça düştüğü gözlemlenmiştir. %7.5 silis dumanı ikamesi klorür geçirimsizliğinde önemli derecede etki yapmasına karşın %7.5-12.5 silis dumanı ikamesinin %7.5 ikame ile gerçekleşen etkiden daha az olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı artışında da silis dumanının oldukça etkili olduğu görülmüştür. Fakat optimum etkinin %7.5-10 ikame ile gerçekleştiği görülmüştür. Bu çalışmadan sonuç olarak %7.5 silis dumanı ikamesi beton için hem dayanım hem dayanıklılık yönünden oldukça yararlı olduğu ifade edilmektedir.

Elahi vd. [53], yaptıkları çalışmada 0.3 su/bağlayıcı oranında silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun beton özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. %7.5 ve %15 silis dumanı ikameli, %20 ve %40 uçucu kül ikameli ve %50 ve %70 oranlarında yüksek fırın cürufu ikameli yüksek performanslı betonlar üretmişlerdir. Basınç dayanımlarının 28 gün sonunda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikame edilen betonlarda azalmasına karşın silis dumanı ikame edilen betonlarda artmış olduğu görülmüştür. Betonda silis dumanı ile beraber kullanılan uçucu kül veya yüksek fırın cürufunun klorür difüzyonu direnci bakımından en iyi sonucu verdikleri ifade edilmektedir.

Dinakar vd. [54], kendiliğinden yerleşen betonlarda %10-%70 oranlarında uçucu külün çimento ile ikame edilerek kullanılması ile elde edilen betonların özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmada 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin %30 uçucu kül

ikamesine kadar arttığı ve daha fazla ikame oranında ise düştüğü gözlemlenmiştir. Su işleme derinlikleri %30 uçucu kül ikamesine kadar fazla bir değişim göstermemekle birlikte %30'dan yüksek ikame oranlarında betonun olumsuz etkilenmiş olduğu ifade edilmiştir. Hızlı klorür geçirimsizliği açısından en iyi sonucu %30 uçucu kül ikameli betonların verdiği görülmüştür.

1.5. Betonun Dayanımı

Beton/betonarme yapı elemanı tasarlanırken hesaplamalar sonucu üzerine ne kadarlık bir yükün geleceği ve yapı elemanında ne tür ve ne kadar bir gerilme meydana getireceği belirlenir. Yapı elemanları bu yükler etkisinde çok küçük bir şekil değiştirme ile yüklere karşı koyacak şekilde tasarlanır. Betonun kendine özgü bir özelliği olarak hesaplamalarda basınç gerilmeleri alacak şekilde tasarlanırlar. Çünkü betonun çekme mukavemeti basınç mukavemetine göre oldukça küçüktür. Betonarme yapıda oluşan bu boşluk donatı kullanılarak ve çekme gerilmelerini donatının alacağı şekilde tasarlanarak aşılabilir.

Beton dayanımı, üzerine gelen yüklerin etkisi ile meydana gelecek şekil değiştirme, çatlama ve göçmelere karşı koyabilme kabiliyetidir. Beton dayanımının yüksek olması için betonu oluşturan agrega ve sertleşmiş çimento hamuru dayanımının yüksek olması gerekir. Ayrıca agrega-çimento arayüzeyi aderansının mükemmel olması gerekmektedir. Normal agregaların genellikle yeterli dayanımda olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla çimento hamurunun dayanımı ve agrega-çimento hamuru arasındaki aderans yüksek dayanım için oldukça önemlidir. Çimento hamurunun dayanımını ve dolayısıyla betonun dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biri çimento hamuru içindeki boşluklardır. Çünkü gerilme yığılmaları boşlukların çevrelerinde oluşabilmekte ve bu durum beton dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir.

Beton veya betonarme yapı elemanı tasarlanırken basınç gerilmeleri alacak şekilde tasarlamak önemlidir. Mümkün oldukça betonun çekme ve kayma gerilmesi alması önlenmeye çalışılmalıdır.

1.5.1. Betonun Dayanımını Etkileyen Faktörler

Beton dayanımını etkileyen faktörler ana başlıklar altında aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Su/bağlayıcı oranı: Su/bağlayıcı oranı yükseldikçe beton içerisinde daha fazla boşluk miktarı oluşmakta ve bu durumda dayanım olumsuz etkilenmektedir.
- Agregâ özellikleri: Agregânın granülometrisi, en büyük tane boyutu, tane şekli ve yüzey dokusu, dayanımı ve içeriklerinde bulunabilecek zararlı maddeler betonun basınç dayanımını etkileyen parametrelerdir.
- Çimento özellikleri: Çimentonun kimyasal özelliği, inceliği, hidratasyon hızı betonun dayanımını etkileyen en önemli parametrelerdir.
- Su: Kama suyu kalitesi betonun dayanımı açısından önemlidir. Beton karışımında kullanılacak suyun standartlara uygun olması gerekir.
- Betona uygulanan karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkılama işlemleri basınç dayanımını etkileyen diğer önemli unsurlardır. Özellikle sıkılama işleminin titizlikle yapılmasına özen gösterilmelidir.
- Kür koşulları ve betonun yaşı: Betonun dayanımı açısından önemlidir [22].

1.6. Betonda Dayanıklılık (Durabilite)

Dayanıklılık; betonun çoğunlukla çevreden gelen ve betonu yıpratabilecek zararlı etkilere karşı gösterdiği dirençtir. Betonla ilgili yapılan birçok çalışma betonun dayanım özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olmasına rağmen bu eğilim son yıllarda biraz farklılık göstermektedir.

Beton ile ilgili güncel olarak üzerinde durulan ve vurgulanan konu betonun durabilitesinin iyileştirilmesi ve yapıların servis ömrünün uzatılmasına yöneliktir. Uygun olmayan tasarım ve inşâ yöntemlerinin yetersizliği nedeniyle beton/betonarme yapıların ömrü kısa olmakta ve daha sonra bu yapıların bakım ve onarımı yüksek maliyetler sebebiyle yapılamamaktadır. Dolayısıyla zorlu çevre koşulları altında hizmet veren yapıları desteklemek için yapılan çalışmalar oldukça önemlidir. Zorlu koşullar altında hizmet veren yapılar, özellikle deniz yapıları uzun süreli dayanıklılık için oldukça endişe vericidir. Deniz ortamında inşâ edilmiş deniz yapısının zarar görmesine neden olan unsurların başlıca nedenleri sülfat atağı ve klorür saldırısı sonucu oluşan donatı korozyonudur. Fakat bu mekanizmaların tümü, nem, sıcaklık, deniz suyunun dinamik etkisine bağlı olarak meydana gelen aşındırıcı etkilerinin birleşmesinden oluşmaktadır [55,56].

Betonun durabilitesi ile betonun geçirimsizliği arasında doğrudan bir ilişki vardır. Geçirimsiz beton daha sıkı, yoğun ve dayanıklıdır. Betonun durabilitesini geliştirme

üzerine yapılan çalışmaların hemen hemen hepsinde betonu daha geçirimsiz yani daha boşluksuz üretebilme isteği vardır. Bu nedenle literatürde çoğu zaman dayanıklılık eşittir geçirimsizlik vurgusu yapılmaktadır. Geçirimsiz ve sıkı üretilen betonun genellikle basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir.

Beton içerisinde gelişen zararlı kimyasal reaksiyonlar betonun yumuşamasına, betonda gözenek oranının artmasına ve bu sebeple geçirimsizliğinin kötüleşmesine neden olur. Bazı yapılarda betona birçok kimyasal etki aynı anda etkiyebilir ve bu etkiler diğer bir etkiyi ortaya çıkarabilir veya şiddetlendirebilir. Betonda kimyasal reaksiyonlara ve zamanla bozulmaya neden olan zararlı iyon veya molekül halindeki maddeler çoğunlukla çevreden taşınır. Bazı durumlarda zararlı maddeler betonun kendi bünyesinde bulunabilir. Bu durumlarda zararlı maddelerin betonda reaksiyona girecekleri yere ilerlemesi gerekir. Madde transferi gerçekleşmezse zararlı reaksiyonlar gerçekleşmez. Bu nedenle beton bünyesinde gelişen kimyasal reaksiyonların oluşmasının ön koşulu betonda taşınan su veya nemin beton içerisine kolayca girebilmesidir. Bu taşınım hızı genellikle çok yavaş olduğundan zararlı reaksiyonlar uzun süreler sonunda ortaya çıkabilir. Kimyasal reaksiyonlar sıcaklık etkisi ile hızlanır. Betondaki zararlı kimyasal reaksiyonlarda da sıcaklık faktörü reaksiyon hızını artıran önemli bir faktördür. Betonda gelişen kimyasal reaksiyonlar fiziksel etkilerin ve biyolojik etkilerin de bu sürece dâhil olması ile hızlanır ve her bir etki ilerleyen zamanla birlikte birbirini tetikler [4].

1.6.1. Betonun Geçirimsizlik Özellikleri

Beton yapılarda kalıcılığı etkileyen tüm fiziksel ve kimyasal bozulmalarda genellikle etkili olan iki temel faktör vardır. Bunlar ortamda olan su varlığı ve beton bünyesindeki boşluklar ve suyun çatlaklar ile taşınımıdır. Bu taşınımın hızı ve etkisi beton içindeki boşluk ve çatlakların büyüklüğüne dağılımına ve birbiri ile bağlantılı olup olmamasına bağlıdır. Agregata genellikle boşluk içermediğinden betonun geçirimsizliği çimento hamurunun geçirimsizliğine ve agregata-çimento hamuru arasındaki aderansa bağlıdır. Geçirimsizlik açısından bakıldığında aynı su/çimento oranında beton harçtan, harç da hamurdan daha geçirimsizdir. Betonda dayanıklılık açısından en zayıf halka agregata-çimento hamuru arayüzeyi ve onun boşluklu yapısıdır [10].

1.6.1.1. Betonun Boşluk Yapısı

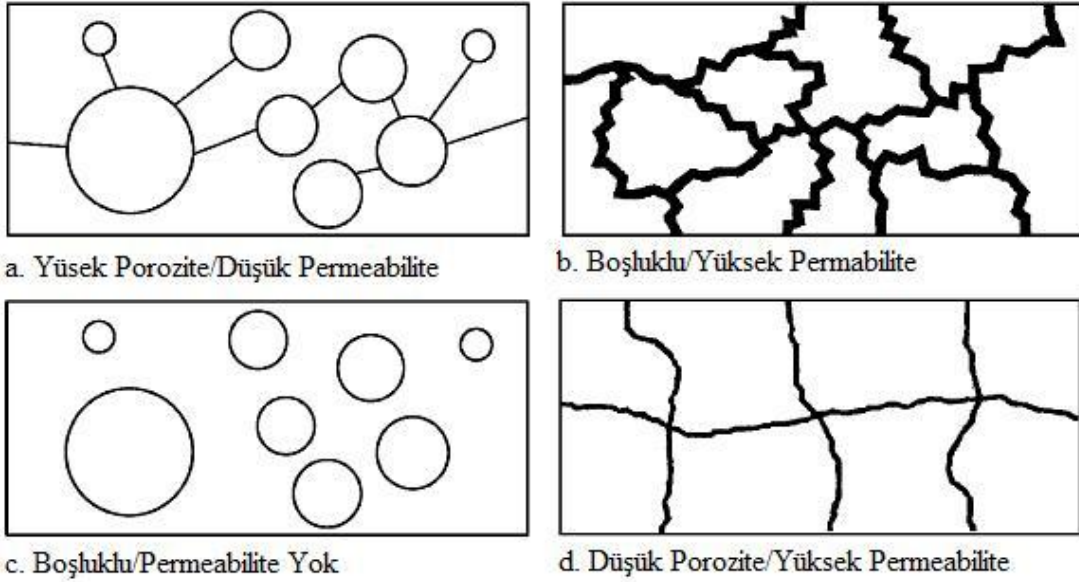
Beton içerisinde farklı nedenlerden ve farklı şekillerde meydana gelen bir takım boşluklar vardır. Betonun geçirimsizlik özelliklerini ve su emme özelliklerini doğrudan ilgilendiren bu boşluklar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- **Jel Boşlukları ve Kapiler Boşluklar:** Betonun hidratasyonu sırasında oluşan C-S-H jellerinin yapısında çok küçük boyutlu boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar jel yapısının yaklaşık olarak %28'ini oluşturmaktadır. Bu tip boşluklardaki su çok düşük sıcaklıklarda donmaktadır. Bu nedenle bu boşluklar betonun geçirimsizliğini ve dayanıklılığını çok fazla etkilememekle beraber bu tip boşlukların beton içindeki hacimsel oranları yükselirse beton için tehlikeli olabilir. Kapiler boşluklar çimento hidratasyonu sonucunda oluşan C-S-H jel parçacıkları arasında yer alan su nedeniyle oluşmaktadır. Beton içerisinde kalan bu boşluklar betonun dayanımını etkilemesinin yanında beton içerisinde suyun ilerlemesine de yol açarlar. Bu tip boşluklar beton içerisinde fazla olduğunda beton içerisindeki su taşınım için kolayca yol bulabilmektedir. Kapiler boşluklardaki su ile donma-çözülme etkileri, bu boşluklara dışardan sızan suyun içerisindeki sülfat ve asit gibi beton içerisinde yabancı maddelerin oluşturacağı kimyasal tepkimeler sonucunda betonda genleşme ve çatlama oluşumuna yol açmaktadır. Günümüzde beton teknolojisinin gelişmesi ile kullanılan kimyasal ve mineral katkıları ile bu boşlukların oranı düşürülebilmekte ve daha dayanıklı betonlar üretilmektedir.
- **Sürüklenmiş Hava Kabarcıkları:** Bu boşluklar betonda hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılarak oluşturulan boşluklardır. Hacimleri toplam beton hacminin %4 ile %8'i arasında değişebilmektedir. Şekilleri küresel olup büyüklükleri 0.05 mm ile 1.25 mm arasında değişebilmektedir. Boşlukların kendi aralarında bağlantı yoktur. Beton üretiminde bilerek oluşturulan bu boşluklar, betonun donma-çözünme etkisine karşı dayanıklılığını arttırmak, işlenebilmeyi kolaylaştırmak, terlemeyi azaltmak gibi betona olumlu katkılar yapmaktadır.
- **Hapsolmuş Hava Boşlukları:** Taze betonun karılması ve yerleştirilmesi esnasında beton içerisine hapsolmüş olan hava boşluklarıdır. Bu tür boşlukların bir kısmı yerleştirme ve sıkıştırma işlemi esnasında kaybolursa bile nihai durumda beton içerisinde bir miktar kalabilmektedir. Beton içerisindeki bu boşlukların hacmi

normal sıkıştırma işlemine maruz kalan betonlarda %0.5 ila %3 mertebesinde değişebilmektedir.

Beton içerisinde bu boşluklara ek olarak terleme ve çimento hamurunun büzülmesi ile oluşmuş boşluklar da bulunabilmektedir [38].

Beton içerisindeki boşlukların hacminin büyük oranda olması her zaman betonun permeabilitesinin yüksek olacağı anlamına gelmemektedir. Diğer bir değişle porozitesi yüksek olan betonun geçirgenliği düşük olabilir veya porozitesi düşük olan bir betonun da permeabilitesi yüksek olabilmektedir. Porozite ve permeabilite arasındaki ilişki Şekil 1.1`de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Porozite ve permeabilite arasındaki ilişkinin gösterimi [57].

1.6.2. Betonda Bozulma Mekanizmaları

Beton içine bir çevresel saldırı aşamasında, korozyona neden olan ürünler bir tabaka olarak beton yüzeyinde oluşmaktadır. Oluşan bu tabakanın porozitesi, birim hacim ağırlığı gibi özellikleri maruz kaldığı ortamın pH derecesine, çimentonun birleşimi ile sülfat ve sodyum klorürün asit faktörüne bağlıdır. Saldırgan bir çözeltinin pH derecesi mikroyapıyı değiştirebilir ve çimento hamurunun kimyasal yapısını yeniden şekillendirebilir. Ancak bu

bozulma mekanizması tam olarak anlaşılammış ve betonun kimyasal saldırılara karşı uzun vadede dayanıklılığı henüz tam olarak tahmin edilememektedir [14,58-60].

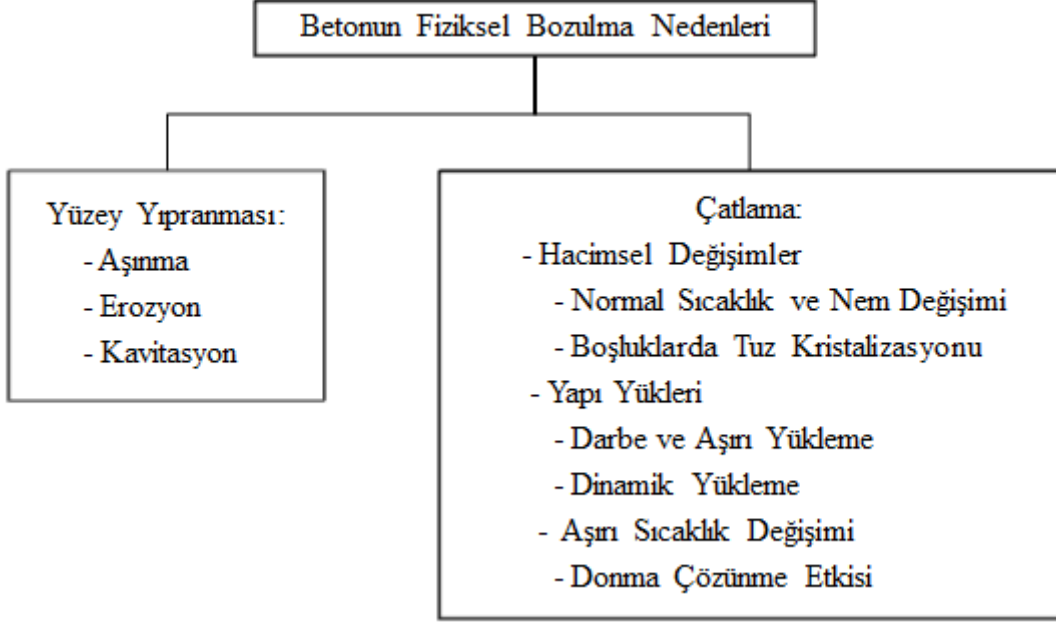
Beton veya betonarme elemanların bozulmasına içerden veya dışardan etki eden fiziksel, kimyasal veya biyolojik etmenler neden olabilmektedir. Beton birkaç etkinin bir arada veya peş peşe etkimesiyle artan bir hızla bozulmaya başlar [4].

Betonda bozulma mekanizmaları ve hızı çimento hamurunun mikroyapısı ve betonun dayanımı tarafından kontrol edilir. Betonla temas halinde olan bazı faktörler, örneğin mevsimsel sıcaklık değişiklikleri, bağıl nem değişiklikleri ve havada bulunan nemdeki zararlı kimyasalların konsantrasyonları, bozulmanın ana sebepleridir [61]. Fakat bozulmaya neden olan en önemli sebep betona nem girişidir. Su/bağlayıcı oranın 0.4 veya daha az tutulması daha az su ile dolu kapiler boşluklar meydana getirerek daha yoğun beton üretimine yol açmaktadır [62].

Yapıların servis ömrünü uzatmanın bir yolu belirli özellikleri daha çok geliştirilen özel betonları inşa edilecek yerin çevre koşullarını bilerek tasarım yapmaktır. Betonun geçirimsizliğini artıracak özellikler su/bağlayıcı oranının düşürülmesi veya beton karışımında kullanılacak uçucu kül ve buna benzer mineral katkıların portland çimentosu ile ikame edilmesi ile sağlanabilir [63,64]. Bu doğrultuda malzeme seçimi ve dayanıklı beton tasarımı arasında bir yol bulunmalı ve en doğru seçim yapılmalıdır.

Beton çeşitli fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda bozulmaya maruz kalabilir. Bu faktörler Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'de verilmektedir.

Şekil 1.2'den görüldüğü üzere betonun fiziksel bozulma nedenleri yüzey ve çatlama ile ilgili olarak iki kısımda incelenebilir. Aşınma, genellikle yol ve endüstriyel döşemelerde üzerinde trafik dolayısıyla oluşan sürtünmedir. Erozyon ise suyun taşıdığı katı parçaların yapıların yüzeyine çarparak oluşturduğu yıpranmadır. Suyu maruz yapılarda bir diğer yıpranma biçimi de gaz kabarcıkları oluşumu ve bunların akan suyun aniden yön değiştirmesi ile patlamasının neden olduğu kavitasyon etkisidir. Bunlara ek olarak hacimsel değişimler, yapı yüklerinin etkisi, aşırı sıcaklık değişimleri betonun fiziksel olarak bozulmasını hızlandıran etkilerdir.



Şekil 1.2. Betonun fiziksel bozulma nedenleri [65].

Şekil 1.3'de II. grup reaksiyonlar Ca^{++} iyonlarının çözünebilir ürünler oluşturarak ayrılması, Ca^{++} iyonlarının çözünmeyen ve genişleme yapmayan ürünler oluşturarak ayrılması ve C-S-H içindeki Ca^{++} ve Mg^{++} iyonlarının yer değiştirerek ayrılması şeklinde üç alt başlık altında incelenebilir.

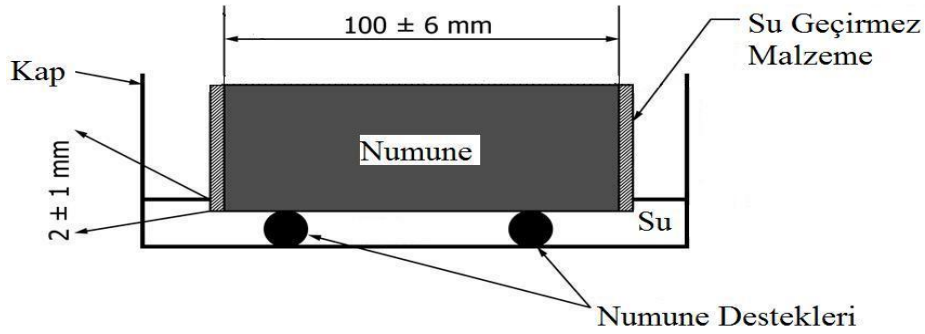


Şekil 1.3. Betonun kimyasal bozulma nedenleri [65].

Şekil 1.3’de III. grup reaksiyonlara sülfat etkisi, DEF (gecikmiş etrenjit oluşumu), alkali silika reaksiyonu, CaO, MgO gecikmiş hidratasyonu ve donatı korozyonu örnek olarak verilebilir [65].

1.6.3. Betonun Kılcal Su Emme Miktarının Belirlenmesi

Beton yapısındaki kapiler boşluklarda su kılcallık etkisi ile beton yapısı içerisinde ilerleyebilmektedir. Su ile temas halindeki yapılarda betonun su ile temas halindeki yüzeylerinden emilen su miktarı belirlenir. Beton veya betonarme yapılarda istenmeyen bu durumun betonda ne kadar etkili olduğunu belirlemek için betonda kılcal su emme deneyi yapılır. Betonlarda su emme deneyini gerçekleştirmek için ASTM C1585 [66] standardı esas alınır. Betonda kılcal su emme miktarının belirlenmesinde kullanılan düzenek şematik olarak Şekil 1.4’de verilmektedir.



Şekil 1.4. Betonda kılcal su emme miktarının belirlenmesi

Kılcal su emme deneyi için hazırlanan beton numuneleri için prizmatik şekilli kalıplar kullanılır. Daha sonra belirli kür sürelerinde ve belirli özellikleri değiştirilen betonlar deney zamanı geldiğinde numuneler tamamen kuruması için 70°C’lik sıcaklığa sahip etüvde en az 24 saat bekletilir. Etüv ortamından çıkarılan numunelerin bir süre soğuması beklenerek deneye hazır hale getirilir. Numuneler soğuduktan sonra numunenin su ile temas edecek olan kısmının çevresinde olan tüm yüzeyler parafin kaplanarak veya başka bir yöntemle su geçirimsiz hale getirilir. Bu şekildeki numunenin ağırlığı tartılarak kaydedilir. Daha sonra numunenin su ile temas edecek kısmı suya yaklaşık 2 mm dalacak şekilde temas ettirilir. Daha sonra numunenin kılcal yolla ne kadar su emdiğini bulmak için

belirli zaman aralıklarında numunenin ağırlığı tartılarak kaydedilir. Yapılan çalışmalar sonucunda betonun emdiği su miktarının zamanın karekökü ile doğru orantılı olduğu belirlenmiş olup ilişkin eşitlik aşağıda (Denklem 1.1) verilmektedir [67].

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

Burada;

ΔQ : Numunenin ağırlığındaki değişimi (g)

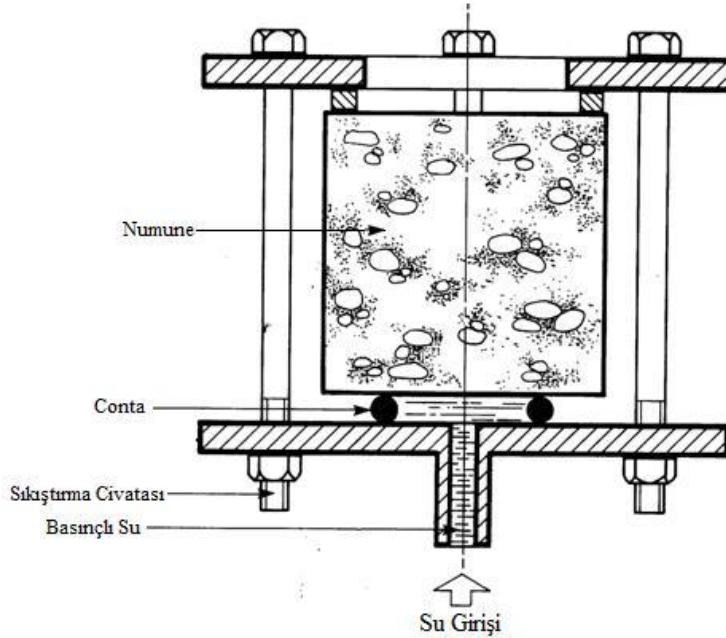
A: Numunenin su ile temas eden yüzey alanını (cm^2)

k: Kılcallık katsayısını

t_d : Deney başlangıcından son okumaya kadar geçen süreyi (dak.) göstermektedir.

1.6.4. Basınçlı Su Geçirirliği

Betonda basınçlı su geçirirliği deneyi yapılarak betonun geçirirliği hakkında bilgi edinilebilir. Deney düzeneğine ilişkin şematik gösterim Şekil 1.5'de verilmektedir.



Şekil 1.5. Basınçlı su işleme derinliği deneyinin şematik gösterimi [68].

Deney TS EN 12390-8 [69] standardı esas alınarak gerçekleştirilmektedir. Standarda göre numuneler üzerinde gerekli hazırlıklar yapıp numuneye 5 bar basınç altında su 72 saat boyunca tatbik edilir. Numuneye işleyen su numune yarılarak incelenir. Maksimum su işleme derinliği (MSİD) ölçülerek betonun geçirimsizliği hakkında bilgi sahibi olunur. İlgili standarda göre bir betonun geçirimsiz beton olabilmesi için MSİD değerinin 50 mm'den küçük zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton olabilmesi için de 30 mm'den düşük olması gerekmektedir.

1.7. Betona Gömülü Donatının Korozyonu

Korozyon maddelerin doğada bulunan en düşük enerjili (en kararlı) durum olan oksit haline geçme olayıdır [4]. Korozyon, paslanma ve oksitlenme gibi terimlerle de ifade edilmektedir.

Uzun zamandır betonarme yapılardaki donatının korozyonu betonun durabilitesi açısından en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Amerika'da betonarme köprülerde ve otoparklarda sadece çözücü tuzların kullanımından dolayı oluşan hasarı onarmak için yapılan harcamalar yıllık 1 milyar dolar civarındadır. Avrupa'da altyapı tesisleri için harcanan ana giderler azalmasına rağmen bu tesislerin bakımı için toplam maliyet artarak yılda 5 milyar dolara kadar yükselmiştir [70].

Korozyon mekanizmasının işleminde etkili olan unsular aşağıda sıralanmaktadır:

- Nem içeriği
- Betonun klorür geçirgenlik direnci
- Betonun boşluk suyunun pH değeri
- Ortamdaki zararlı maddeler (Cl⁻ iyonları gibi)
- Sıcaklık
- Oksijenin varlığı
- Pas payı tabakasının kalınlığı
- Donatı çeliğinin özellikleri

Korozyon olayının varlığı için dört temel unsur söz konusudur. Bu dört temel unsurdan herhangi birinin eksikliği korozyon sürecinin kesintiye uğratar. Bu unsurlar;

- Anodik reaksiyon
- Katodik reaksiyon
- Anodik ve katodik bölgeler arasında iyon transferi

- Elektron akışı [71]

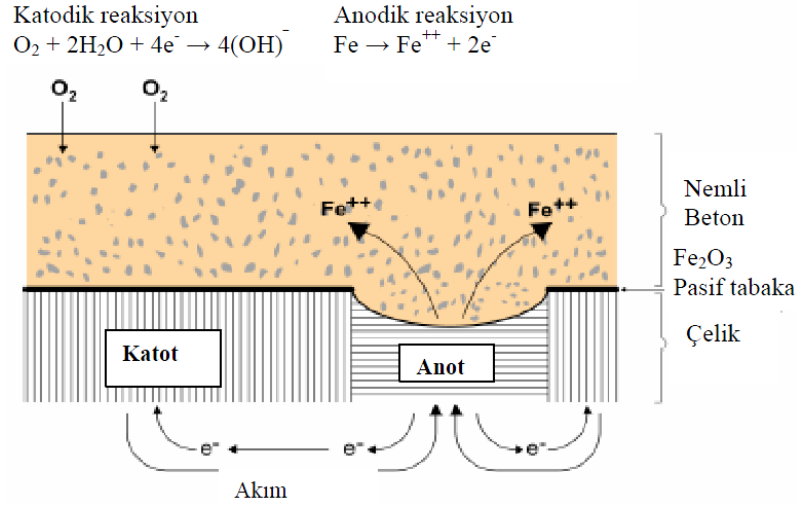
Anodik reaksiyon metalin çözünmesini ifade eder. Demir için bu reaksiyon denklem 1.2’de verilmektedir.



Katodik reaksiyon ise indirgeme reaksiyonudur. Su ve oksijenin hidroksil iyonlarını oluşturduğu indirgeme reaksiyonu Denklem 1.3’de verilmektedir.



Oluşan bu reaksiyonlara ilişkin şematik gösterim Şekil 1.6’da verilmiştir. İlgili şekilden görüleceği üzere elektron kaybeden demir atomları iyon haline (Fe^{++}) geçer ve betonun içerisine taşınmaya başlar. Anodik reaksiyonun diğer ürünü olan elektronlar katodik bölgeye akar. Burada elektronlar su ve oksijen ile birleşerek hidroksil iyonu (OH^-) oluştururlar.



Şekil 1.6. Betona gömülü çelik donatının korozyonunun şematik gösterimi [72].

Oluşan anodik ve katodik reaksiyonlar sonucunda Fe^{++} iyonları betondaki boşlukların içinden ilerleyerek katodik bölgedeki OH^- iyonları ile birleşir. Bu reaksiyonlar neticesinde önce ferro hidroksit, daha sonra ferri hidroksit oluşur. Ferri hidroksit daha

sonra ferri okside (pas) dönüşür. Bu korozyon süreci Denklem 1.4-1.6'da verilmiştir. Betonarme donatı korozyonuna maruz kalmış bir yapı Şekil 1.7'de verilmektedir.



Şekil 1.7. Betonarme yapılarda ilerlemiş donatı korozyonu [73].

Betonarme yapılarda korozyon ölçümü için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

- Korozyon potansiyeli ölçümü (Yarı hücre potansiyeli)
- Polarizasyon direnci (Lineer polarizasyon)
- Beton özdirenci (Resistivite)
- AC empedans yöntemi

1.7.1. Korozyona Yol Açan Etkenler

Hidrate olmamış Ferri oksit beton içerisinde iki kat hacim artışına neden olmaktadır. Hidrate olduğunda ise hacimsel olarak genişleyen bu yapının hacim artışı 6-10 kat olabilmektedir. Bu sebeple betonda çatlama ve dökülmeler oluşmaya başlamaktadır. Bu durumda beton daha geçirimli hale gelmekte ve korozyon süreci hızlanmaktadır. Korozyon sürecinde sadece betonun dayanıklılığı değil dayanımı da azalmaktadır. Çelik donatı kesitinde azalmalar ve betonun boşluk yapısında artışlar nedeniyle dayanım düşüşü gerçekleşmektedir [8].

Beton sahip olduğu yüksek alkali (pH = 12-13) ortamı sayesinde içerisinde bulunan donatının korozyona karşı korunmasını büyük oranda sağlar. Bu ortam şartlarında beton içinde bulunan donatı yüzeyinde ince gama ferri oksit de denilen pasif bir tabaka oluşur. Bu pasif film tabaka yoğun ve korozyona karşı koruyucu bir katmandır. Pasif tabaka yapının servis verdiği sürece stabildir fakat iki bozulma mekanizması tarafından yok edilebilir. Bunlar karbonatlaşma ve klorürdür [74].

1.7.1.1. Karbonatlaşma Etkisi

Karbonatlaşma atmosferden CO₂'nin difüzyon ile betona girerek ve beton içerisindeki boşluklarda betonun alkali bileşenleriyle reaksiyona girerek meydana gelen kimyasal bir reaksiyondur.



Karbonatlaşma reaksiyonuna ait reaksiyon denklemi Denklem 1.7'de sunulmuştur

1.7.1.2. Klorür Konsantrasyonunun Etkisi

Klorür iyonlarının betonun sahip olduğu pH derecesine etkisi çok azdır. Yine de boşluk çözeltisindeki klorür konsantrasyonu kritik değeri aşarsa klorür iyonları kolayca donatının pasivasyon tabakasını delebilir [75].

Klorür; deniz suyu, priz hızlandırıcı katkı maddeleri, denizden çıkarılan agregalar, buz eritici kimyasallar gibi kaynaklardan betona girebilir. Donatının yüzeyindeki koruyucu

tabaka ile reaksiyona giren klorür demir klorür birleşiminde suda çözünebilen çok boşluklu bir yapıya dönüşür. Bu nedenle beton içerisinde yer alan klorür miktarı 0.6-1.2 kg Cl⁻/m³ eşik değerini aşmamalıdır [22]. Beton içerisindeki boşluklardaki klorür konsantrasyonu kritik seviyeyi aştığında, klorür iyonları donatının yüzeyini anot olarak aktive eder ve pasif tabaka da katot vazifesini görür [8].

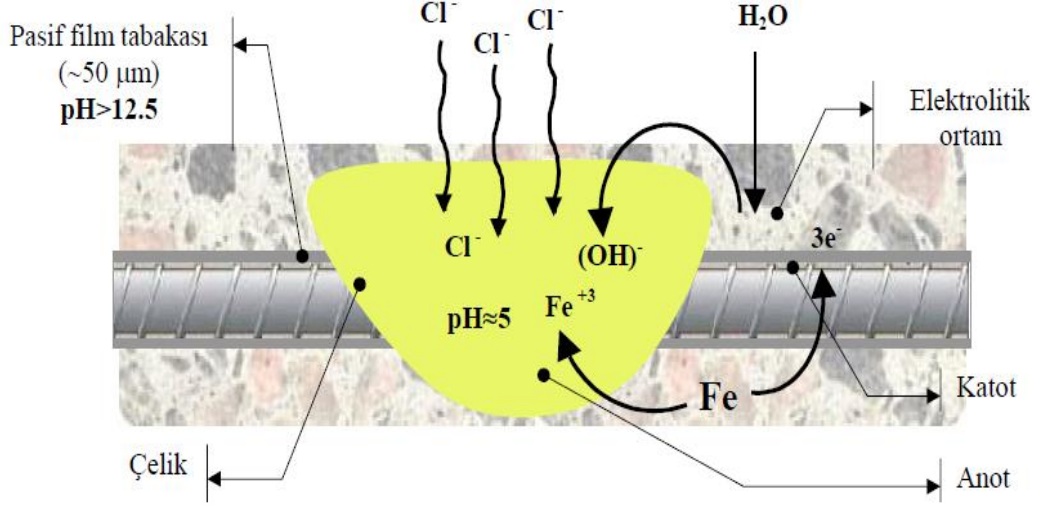
Donatı korozyonu esnasında demir +2 veya +3 yükseltgenme basamağı olmak üzere iki farklı yükseltgenme basamağında yükseltgenebilir. +2 basamağında yükseltgenen demir için kimyasal reaksiyon gelişimi aşağıdaki gibidir (Denklem 8-10).



Denklem 1.8-1.10'dan görüleceği üzere anodik ve katodik reaksiyonlar sonucunda oluşan +2 basamağındaki demir iyonu Cl⁻ iyonları ile reaksiyona girdiğinde Ferro klorürü oluşturur. Ferro klorürün su ile reaksiyonundan hidroklorik asit oluşur. Daha sonra bu hidroklorik asit bileşenlerine ayrışır ve aynı döngünün tekrar ve daha şiddetli bir şekilde olmasını sağlar [38,76].

+3 basamağında yükseltgenen demir ise benzer şekilde aşağıdaki reaksiyon döngüsüne girer (Denklem 1.11-1.12).





Şekil 1.8. Klorlu ortamlarda korozyon gelişiminin şematik gösterimi [10].

Şekil 1.8 demir korozyonunun klorür etkisinde oluşma mekanizmasını şematik olarak göstermektedir. Burada +3 basamağında yükseltgenen demirin Ferri klorür olarak bozulmasını göstermektedir.

1.8. Betonlarda Klorür Geçirirliği

Betona klorür girişi üç yolla gerçekleşebilmektedir. Bunlar;

- Difüzyon
- Kılcal su emme
- Hidrostatik basınçtır.

Fakat betona klorür iyonu geçişi daha çok difüzyonla alakalıdır. Difüzyon ise klorür iyonlarının derişimi farkından oluşur. Difüzyonla klorür geçişinin vuku bulması için beton sürekli nemli ortamlarla temas halinde olmalı ve ortamın klorür iyonu konsantrasyonunun yüksek olması gerekir.

Klorür geçirirliği için bir diğer mekanizma beton içine işleme şeklinde gerçekleşir. Ortamda bir hidrolik basınç varsa betona klorürün işlenmesi olasıdır.

Bir diğer geçiş mekanizması ise su emme ile klorür geçişidir. Beton çevresiyle etkileşim halinde olduğu için sürekli olarak ıslanma kuruma durumuna maruz kalacaktır. Beton, içerisinde muhtemelen klorür iyonu bulunan su ile temas ettiği zaman su kapiler emme vasıtasıyla içerisindeki boşluklara sürüklenecektir.

Eğer beton çok kötü kalitede değilse genellikle bu geçiş mekanizması kuruma derinliğinin az olması durumunda önemsenecek düzeylerde olmayacaktır. Kılcal su emmede kritik derinliğe ulaşan klorür iyonu konsantrasyonu yüksek su donatı ile olan mesafeyi çok azaltırsa klorür iyonları donatıya kolayca erişebilecektir [77].

Ana geçiş mekanizması difüzyon olmak üzere yukarıda açıklanan beton içine üç farklı klorür giriş mekanizmasında da klorür iyonları beton içerisine girip donatının olduğu seviyeye ulaşabilir. Hidrostatik basınç ile klorür geçişi durumu nadir karşılaşılan bir durumdur. Su emme ile geçişte ise genellikle donatının paspayı ile korunması durumu etkili olmaktadır [78].

Diğer difüzyon durumlarında olduğu gibi beton içindeki klorür difüzyonu da 1. Fick Yasasına göre açıklanabilir (Denklem 1.13):

$$J = -D_{\text{eff}} \frac{dC}{dx} \quad (1.13)$$

Burada;

J: Klorür iyonu akısı

D_{eff} : Efektif difüzyon katsayısı

C: Klorür iyonu konsantrasyonu

x: Konum değişkenini ifade etmektedir.

Denklem 1.13 kararlı hale gelen sistemler için geliştirilen klorür konsantrasyonunun hiç değişmediği durumlarda geçerlidir. Değişen konsantrasyon durumlarında 2. Fick Yasası uygulanmaktadır (Denklem 1.14):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1.14)$$

Sınır şartlarından bu denklemin aşağıdaki şekli aldığı görülür (Denklem 1.15):

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{\text{eff}}t}} \right) \quad (1.15)$$

Burada;

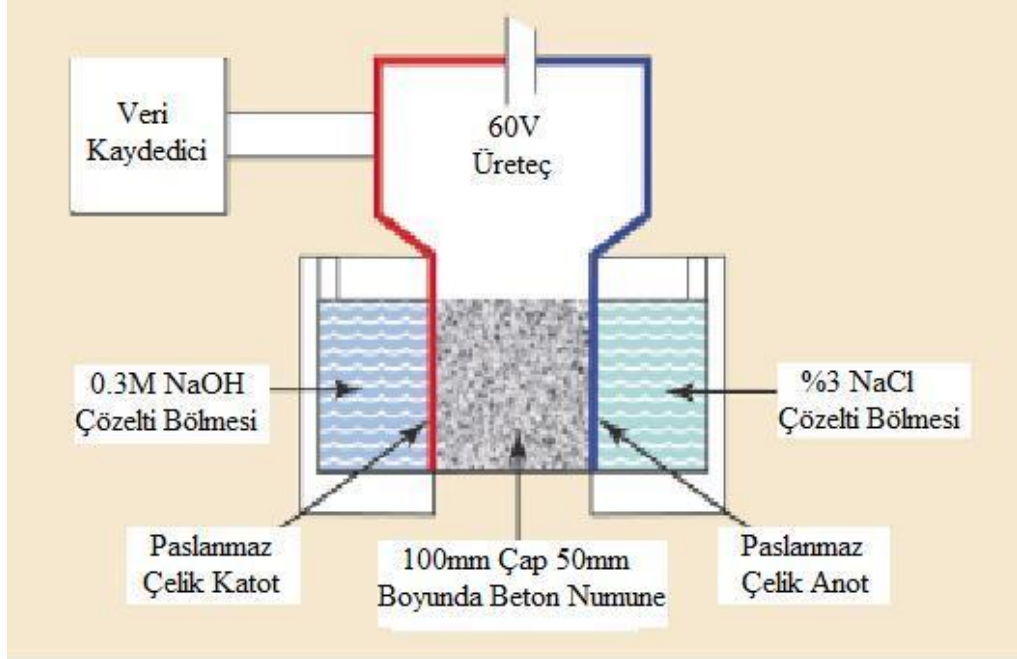
erf: Matematik tablolarında bulunan hata fonksiyonunu ifade etmektedir.

Betona klorür girişi betonun boşluk yapısı ile ilişkilidir [78].

1.8.1. Hızlı Klorür Geçirimsiliği

Klorür geçirimsiliği yüksek olan beton içerisine klorür iyonlarının daha kolay girmesini ve donatıya daha kolay ulaşmasını sağlayarak donatı çeliğinin korozyonunun oluşma olasılığını artırır ve hızlandırır. Dolayısıyla betonlarda donatı korozyonunu önlemek veya azaltmak için klorür geçirimsiliği düşük olan beton üretimi oldukça önemlidir.

Betonun klorür iyonu geçirimsiliğini belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Hızlı Klorür Geçirimsiliği Deney yöntemidir. Deney, ASTM C 1202 [79] standardına göre gerçekleştirilir. Deney esasen betonun elektriksel iletkenliğinin incelenerek betonun klorür iyonu geçirimsiliğine karşı göstereceği direncin belirlenmesine ve numuneden geçen akımla betonun klorür iyonu geçirimsiliği hakkında bilgi edinilmesi esasına dayanır.



Şekil 1.9. Hızlı klorür geçirimsiliği deney düzeneğinin şematik gösterimi

Şekil 1.9’da deneye ait düzenek verilmektedir. İlgili standarda göre 100 mm çapında ve 50 mm kalınlığında numuneler hazırlanır. Numunenin deney için ön hazırlıkları yapıldıktan sonra numune cihaza Şekil 1.9’daki gibi silikon yardımıyla yerleştirilir. Hücrelerden birine %3 NaCl çözeltisi, diğerine ise 0.3 NaOH çözeltisi doldurulur. NaCl çözeltisi olan hücre (-) kutba, NaOH çözeltisi olan hücre ise (+) kutba bağlanır. 6 saat boyunca 60 V gerilim uygulanarak devreden geçen akım her yarım saatte bir okunur ve kaydedilir. Standartta belirtilen Deklem 1.16 yardımıyla devreden geçen toplam akım ölçülür.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1.16)$$

Burada;

Q: toplam geçen akım miktarı (Coulomb)

I_x : x. dakikada devreden geçen akım

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Agregalar

Çalışma kapsamında kalker esaslı kırmataş ve kırma kum kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak agregaların öncelikle özgül ağırlıkları belirlenmiştir. Agregalar özgül ağırlık deneyinden önce serilerek kuruması sağlanmış ve daha sonra 500 g alınan agreganın numuneleri doymuş hale gelene kadar su içinde bekletilmiştir. Suyu doymuş hale getirilen agregaların yüzeyi kurutularak kuru yüzey doymuş (KYD) hale getirilmiştir. Gerçekleştirilen özgül ağırlık deneyi ile bahis konusu agregalara ilişkin belirlenen özgül ağırlıklar Tablo 2.1 verilmektedir.

Tablo 2.1. Agregaların özgül ağırlıkları

Kırmataş (g/cm ³)	2.74
Kırma kum (g/cm ³)	2.64

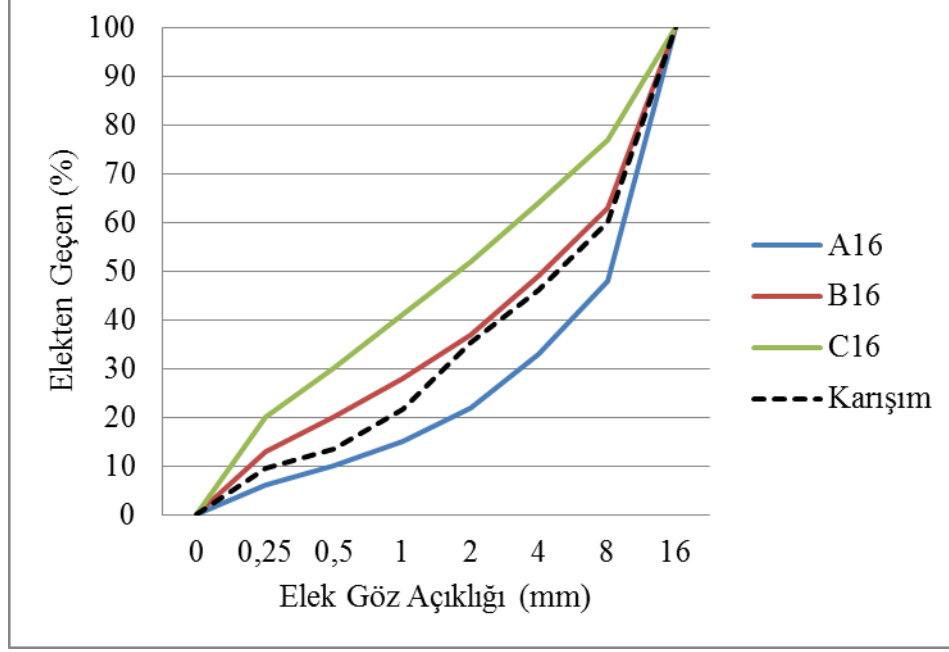
Agregalara ilişkin deneysel olarak belirlenen su emme ve nem içeriği değerleri de Tablo 2.2 verilmektedir.

Tablo 2.2. Agregaların su emme ve nem içerikleri

Agrega Cinsi	Su Emme (%)	Nem İçeriği (%)
Kırmataş	1.00	0.25
Kırma kum	2.60	1.60

Agregaların granülometrisini belirlemek amacıyla 8 kg agreganın numunesi elek analizine tabi tutulmuş ve her elek üzerinde kalan miktarlar tartılarak kaydedilmiştir. Agregaların granülometri eğrileri belirlenerek en uygun agreganın karışım oranları deneme

yanılma yoluyla bulunmuştur. Beton karışım agregasına ait granülometri eğrisi Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Karışım agregasına ilişkin granülometri eğrisi

2.1.2. Çimento

Çalışma kapsamında Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ilişkin fabrikadan temin edilen kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2.3’de verilmektedir.

Tablo 2.3. Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	45 mikron elek üstünde kalan (%)	9.8	
SiO ₂	19.46	90 mikron elek üstünde kalan (%)	1	
Al ₂ O ₃	5.11	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4126	
Fe ₂ O ₃	3.31	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.12	
CaO	60.23	Priz Süresi (Vicat) (dak)	Başlangıç	140
MgO	2.08		Bitiş	200
SO ₃	3.05	Su İhtiyacı (%)		29.2
Na ₂ O	0.27	Hacim Genleşmesi (mm)		1
K ₂ O	0.69	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	28
Cl ⁻	0.02		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	3.00		28 gün	51.5

2.1.3. Su

Beton karışımları için içilebilir şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

2.1.4. Uçucu Kül

Çalışma kapsamında kullanılan uçucu kül Zonguldak-Çatalağzı Termik Santralinden temin edilmiştir. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) bünyesinde bulunan laboratuvarın ilgili biriminde yaptırılan analiz sonuçları Tablo 2.4'de verilmektedir.

Tablo 2.4. Uçucu küle ait bazı özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
Bileşenler	%	Yoğunluk, g/cm ³	2.34
SiO ₂	61.57	45 mikron elek bakiyesi, %	16.5
Al ₂ O ₃	20.25		
Fe ₂ O ₃	7.3		
CaO	1.54		

Çalışmada kullanılan uçucu külün tipi yapılan analizler sonucunda

- TS EN 197-1 standardına göre V sınıfı uçucu kül
- ASTM C 618 standardına göre F sınıfı uçucu kül sınıfına girmektedir.

2.1.5. Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanı İKSA Beton ve Yapı Kimyasalları tarafından temin edilmiştir.

2.1.6. Kimyasal Katkı Maddesi

Deneysel çalışmada BASF`den temin edilen polikarboksilik eter esaslı Glenium 51 süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kimyasal katkı maddesinin kullanım amacı istenilen çökme değerini sağlamaktır.

2.2. Beton Karışımları

Çalışma kapsamında amaca uygun olarak üretilen betonlarda uçucu kül ve silis dumanı ikamesinin betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Tüm üretimlerde çimento olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış olup su/bağlayıcı oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur.

Beton karışımlarında 290 kg/m^3 ve 340 kg/m^3 olmak üzere iki farklı toplam bağlayıcı miktarı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen üretimlerde çökme 6 cm olarak tutulmaya çalışılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için Glenium 51 süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Uçucu kül %10, %20, %30 oranlarında çimento ile ikame edilerek beton karışımları gerçekleştirilmiştir. Silis dumanı kullanılarak üretilen beton karışımlarında ise silis dumanı çimento ile %5, %10, %15 oranlarında ikame edilmiştir. Yukarıda bahsedilen ikame oranları 290 kg/m^3 ve 340 kg/m^3 dozajlı betonların her biri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Ayrıca her iki dozaj için uçucu kül veya silis dumanı içermeyen şahit betonlar da üretilmiştir. Bu şekilde 7 adet 290 kg/m^3 bağlayıcı dozajlı ve 7 adet 340 kg/m^3 dozajlı olmak üzere toplamda 14 farklı karışım hazırlanmıştır.

Tablo 2.5 beton karışımlarını özetlemektedir. Beton üretiminde tüm seriler için su/bağlayıcı oranı 0.5 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bağlayıcı olarak bahsedilen

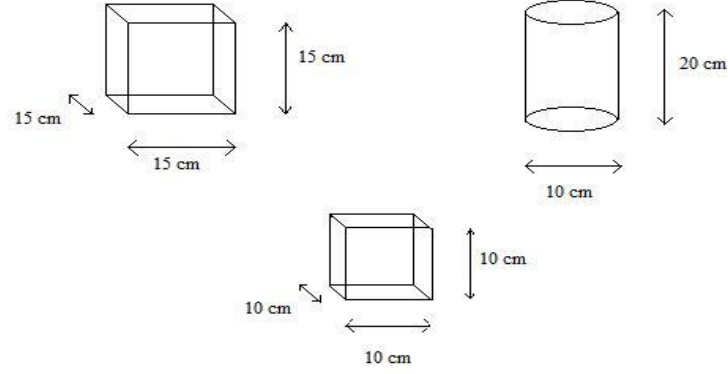
serilerdeki çimento, çimento+uçucu kül veya çimento+silis dumanı miktarlarının toplamını belirtmektedir. Numune kodlarını verilmesinde sırasıyla B betonu, 290 veya 340 toplam bağlayıcı dozajını Ş harfi o dozaj için şahit betonu, UK uçucu kül ikameli betonu, SD silis dumanı ikameli betonu sondaki sayılar ise ikame oranını göstermektedir.

Tablo 2.5. Beton karışımları

Kodlama	Toplam Bağlayıcı (kg/m ³)	İkame Oranı (%)	Çimento Miktarı (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)	Katkı (kg/m ³)
B290Ş	290	0	290	0	-	1994.50	5.56
B290UK10		10	261	29	-	1985.75	5.24
B290UK20		20	232	58	-	1977.00	4.89
B290UK30		30	203	87	-	1968.25	3.67
B290SD5		5	275.5	-	14.5	1989.36	8.00
B290SD10		10	261	-	29	1984.21	7.20
B290SD15		15	246.5	-	43.5	1979.06	6.80
B340Ş		340	0	340	0	-	1883.87
B340UK10	10		306	34	-	1873.61	3.56
B340UK20	20		272	68	-	1863.34	2.93
B340UK30	30		238	102	-	1853.08	2.47
B340SD5	5		323	-	17	1877.83	4.68
B340SD10	10		306	-	34	1871.80	4.00
B340SD15	15		289	-	51	1865.76	6.40

2.3. Üretilen Betonlar ve Kür Süreleri

Üretilen betonların dayanıklılık ve dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla her bir üretim için 4 adet 15 cm küp numune, 2 adet 10 cm küp numune ve 1 adet 10 cm çapında ve 20 cm yüksekliğinde beton numuneler üretilmiştir. Her bir karışım için toplamda aynı sayıda numune üretilmiştir. Üretilen beton numune boyutları şematik olarak görünümüleri Şekil 2.2’de, her bir seride üretilen numunelere ilişkin foto Şekil 2.3’de verilmektedir.



Şekil 2.2. Üretilen beton numune boyutları



Şekil 2.3. Bir dökümde üretilen beton numuneler (kalıpları içinde)

Üretilen numunelerden 2 adet 15 cm boyutlu küp numuneler basınç dayanımı deneyi için, diğer 2 adet küp numune basınç altında su işleme derinliği deneyi için, 2 adet 10 cm küp numune kılcal su emme deneyi için ve silindirik numune de hızlı klorür geçirimsizliği deneyi için kullanılmıştır. Beton üretimlerinde kullanılan mikser Şekil 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Beton üretimlerinde kullanılan mikser

Üretimlerde kalıplar yarısına beton ile doldurulduktan sonra sarsma tablasında vibrasyon uygulandı. Daha sonra diğer yarısı beton ile doldurulduktan sonra tekrar sarsma tablasında vibre edildikten sonra üzerleri mala ile düzeltildikten sonra 1 gün kalıplarında bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılarak standart kür havuzuna bırakılmıştır. Beton üretiminde kullanılan mikser ve sarsma tablasına ait foto Şekil 2.5’de verilmektedir.



Şekil 2.5. Vibrasyon uygulaması için kullanılan sarsma tablası

Hızlı klorür geçirimsizliği deneyi 28 gün ve 90 gün standart su kürü sonrası; basınç altında su işleme derinliği tayini deneyi, kılcal su geçirimsizliği deneyi ve basınç dayanımı deneyleri 28 gün standart su kürü sonrası belirlenmiştir.

Üretilen numuneler kalıplarında bir gün bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılarak su kürüne tabi tutulmuştur. Su kürü için numuneler $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de musluk suyu ile dolu su havuzuna yerleştirilmiş ve 28 ve 90 gün boyunca deney gününe kadar bekletilmiştir.

2.4. Yapılan Deneyler

Üretilen betonlar için taze halde ve sertleşmiş halde gerçekleştirilen bazı deneyler aşağıda verilmektedir.

2.4.1. Taze Beton Deneyleri

2.4.1.1. İşlenebilme (Çökme) Deneyi

Yeni karılan taze beton üzerinde TS EN 12350-2 [38] standardına uygun şekilde çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Hedef çökme değeri karışıma kimyasal katkı maddesi eklemek suretiyle belirlenmiştir. Hedef çökme tüm karışımlar için 6 cm dir. Çökme deneyine ilişkin foto Şekil 2.6'de verilmektedir.

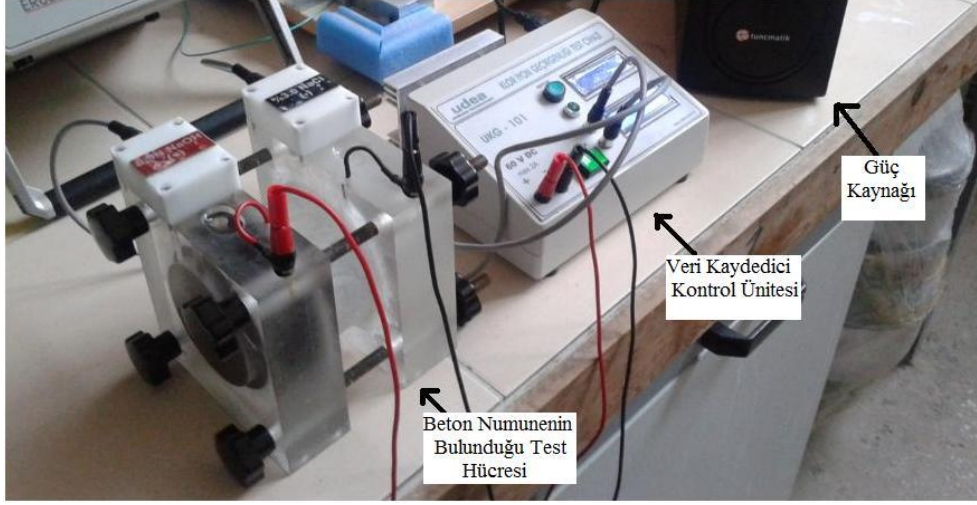


Şekil 2.6. Çökme değerinin ölçülmesi

2.4.2. Sertleşmiş Beton DeneYleri

2.4.2.1. Hızlı Klorür Geçirirnililiği Deneyi

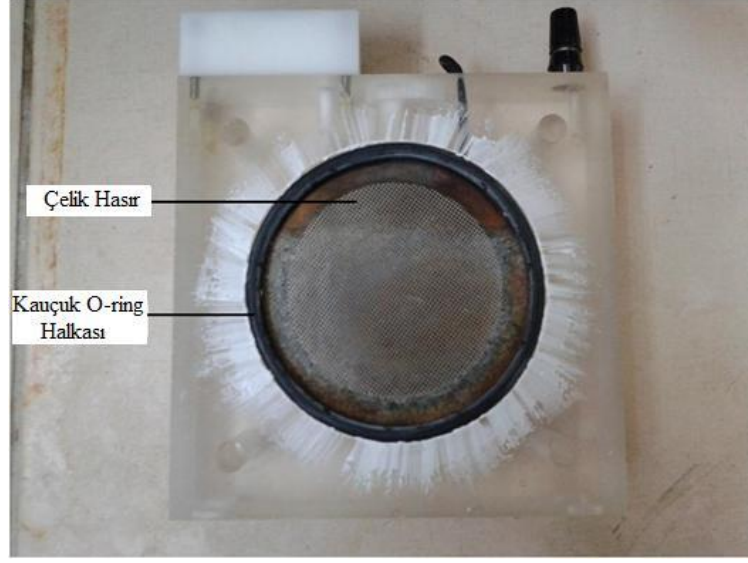
Betonlarda hızlı klorür geçirirnililiğini tayin etmek için ASTM C 1202 standardında belirtilen yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneyi gerçektelemede Şekil 2.7’de verilen hızlı klorür geçirirnililiği deney düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Hızlı klorür geçirirnililiği test düzeneği

Bu deney vasıtasıyla çözeltilerin betona nüfuz etmesine göre betonun elektriksel iletkenliğinin değişimi ölçülmeye çalışılmaktadır.

Deneyi gerçektelemede önceden hazırlanan 20 cm yüksekliğinde ve 10 cm çapında silindirik numuneler kullanılmıştır. Standart kür ortamında kür edilen silindirik numuneler 28 ve 90 gün sonunda kür havuzundan çıkarılarak iki ucundan yaklaşık 2.5 cm kesilerek ortada kalan kısım 5 cm yüksekliğinde 3 eşit parçaya bölünmüştür. Bu şekilde hazırlanan beton disklerin 15-30 dakika süresince yüzeylerinin kuruması beklenmiştir. Yüzeyleri kuruyan numunede, numunenin yüzeyine sürülen silikon numunenin yüzeyine daha iyi yapışmaktadır. Yüzeyleri kuruyan numuneler test hücresinde O-ring halkalarına oturtularak test hücresine yerleştirilmiştir. Hücrelerdeki çözeltilere temas etmeyen kısımlar beyaz silikon sürülerek kaplanmıştır. DeneYlerde kullanılan hücreler ve O-ring halkası Şekil 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.8. Deney düzeneğine ait hücrelerin iç tarafının görünümü

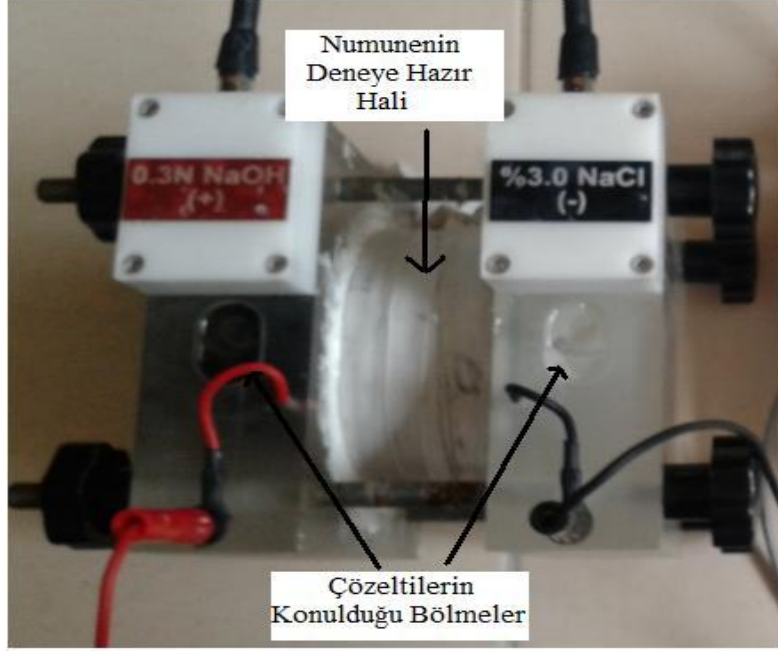
Şeffaf silikon yerine beyaz silikon kullanılmasının nedeni numunenin yüzeyinde sürülmeyen veya az miktarda sürülen bölgeyi daha iyi görerek numunede açık kalan bölge olmamasını sağlamaktır. Numunelerin deneye hazırlanma aşaması Şekil 2.9'de görülmektedir.



Şekil 2.9. Numunelerin deneye hazırlık aşaması

Numunelerin hücrelere silikon vasıtasıyla yerleştirme işlemi bittikten sonra silikonun kuruması için test hücresine yerleştirilmiş numune 3-4 saat kadar kurumaya bırakılmıştır. Silikonun kurumasından sonra silikon sürülen yüzeyler numunenin çevresi boyunca bir

lastikle sıkıca sarılmıştır. Bunun amacı deney esnasında ısınan numune yüzeyinden silikonun ayrışmasını önlemektir. Numunelerin deneye hazır son hali Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10. Numunelerin deneye hazır hale getirilmesi

Deneye hazır hale getirilen numune için test hücrelerinin birine 0.3 N NaOH, diğerine ise %3 NaCl çözeltisi doldurulmuştur. 60 V potansiyel farkı oluşturulan aparatın (+) kutbu içinde NaOH bulunan hücreye, (-) kutbu içinde NaCl bulunan hücreye bağlanmıştır. Deneyde olası elektrik kesilmelerinden etkilenmemek amacıyla deney esnasında bir güç kaynağı da kullanılmıştır.

Deneyin başlamasından 6 saatlik bitiş süresine kadar her yarım saatte bir o anki devreden geçen akım ölçülüp kaydedilmiştir.

2.4.2.2. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini

Basınç altında su işleme derinliği tayini TS EN 12390-8 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney 28 gün süresince standart kür gören numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basınçlı su deneyi her seri üretimden elde edilen iki adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Kürden çıkarılan numunelerin laboratuvar ortamında yaklaşık 5 saat kuruması beklenmiştir. Numunelerin su tatbik edilecek yüzeyleri tel fırçayla iyice ovalanarak yüzeyde çimento hamurunun yoğun birikmesi sonucu su girişini engellemesi durumu ortadan kaldırılmıştır.

Su yalıtımı için BASF firmasından temin edilen Masterseal 525 isimli malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme toz ve sıvı olmak üzere iki farklı bileşimden oluşmaktadır. Toz ve sıvı ilgili katalogda belirtilen oranlarda bir karıştırılmış ve karışım macun haline getirilmiştir. Daha sonra küp numunenin su işlenecek olan yüzeyinin ortası hariç (contanın iç kısmında yaklaşık 10 cm çapında su girişinin bulunduğu orta kısım hariç) tüm yüzeye uygulanmıştır. Su yalıtım malzemesinin kullanılmasındaki amaç deney esnasında kullanılacak kauçuk contaların numune ile temasını kuvvetlendirerek basınçlı suyun beton-conta arasından dışarıya sızmasını önlemektir. Şekil 2.11 numunelerin deneyden önceki (sol) ve deneyden sonraki (sağ) görünümünü göstermektedir.



Şekil 2.11. Basınçlı su tatbik edilecek yüzeylerin deney öncesi (sol) ve deney sonrası (sağ) görünümü

Su yalıtım malzemesi uygulanan numuneler 1 gün süreyle kurumaya bırakılmıştır. Bu süre sonunda numuneler deneye hazır hale gelmiş olur.

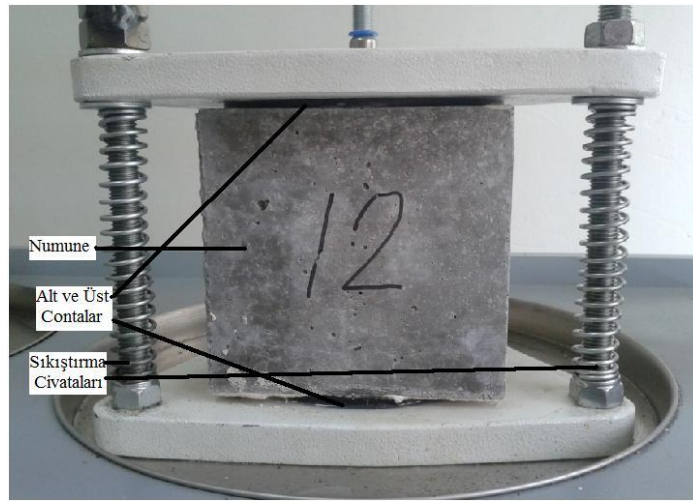
Numuneler basınçlı su işleme derinliği tayini cihazına yerleştirilirken öncelikle kauçuk contalardan alt kısmın contası bağlanır ve contanın kalınlığı seviyesine kadar su giriş vanası açılarak su verilir. Daha sonra numunenin basınçlı su tatbik edilecek yalıtımlı yüzeyi alta gelecek şekilde cihaza yerleştirilir. Üst contada numune ve cihaz arasında

yerleştirildikten sonra tüpler su ile doldurulup kompresörden gelen basınçlı hava sisteme verilir. Şekil 2.12 deney düzeneğini göstermektedir.



Şekil 2.12. Basınçlı su işleme derinliği tayini deneyi cihazı

Deneyde numunelere 72 saat boyunca 5 bar basınç altında su tatbik edilmiştir. Daha sonra numuneler cihazdan çıkarılıp basınçlı su tatbik edilen yüzeye dik olacak şekilde numune ortadan ikiye yarılarak suyun işleme derinliği yüzey boyunca bir kalemle işaretlenmiştir. İşaretlenen bu yüzey daha sonra asetat kâğıdına geçirilmiştir. Şekil 2.13 numunelerin deney cihazına bağlanmış halini göstermektedir. Yarma işlemine ait düzenek ve yarılan numunenin görüntüsü Şekil 2.14’de verilmektedir.



Şekil 2.13. Basınçlı su işleme derinliği hücresi



Şekil 2.14. Numuneleri yarma işlemi ve yarılmış numune yüzeyinin görünümü

Yarma sonucu su işleme derinlikleri beton kurumadan kalemle çizilmiştir. Bu çizimler asetat kâğıdına geçirildikten sonra tüm çizimler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Tüm numuneler için maksimum su işleme derinlikleri ve ortalama su işleme derinlikleri excel ortamında belirlenmiş ve temsili şematik çizimler her bir seri için elde edilmiştir.

2.4.2.3. Kılcal Su Geçirimsizliği Deneyi

Beton için kılcal su emme katsayısını belirlemek için gerekli düzeneği ve deneyi ASTM C 1585 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [66].

Deney için hazırlanan iki adet 10 cm küp numune 28 gün standart su küründen sonra kuruması için 70°C etüvde iki gün süreyle bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler laboratuvar ortamında soğumaya bırakıldı. Numuneler soğuduktan sonra suya temas edecek yüzeyin yan kısmındaki yüzeyler su geçirimsiz bant ile geçirimsiz hale getirilmiştir. Numuneler suya 2 mm dalacak şekilde metal desteklerle oluşturulan düzeneğe yerleştirilmiştir. Numunenin ağırlığı 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60 ve 1440 dakika ara ile ölçüldü ve kayıt altına alındı. Numunenin bu süreler sonunda emdiği su miktarı dikkate alınarak kılcallık katsayısı cm^2/s cinsinden belirlenmiştir. İlgili deneye ait deney düzeneği Şekil 2.15’de verilmektedir.



Şekil 2.15. Kılcal su geçirimsizliği deney düzeneği

Zamana bağlı olarak emdiği su miktarı dikkate alınarak betonun kılcallık katsayısı $q = \frac{Q}{A} = k \times \sqrt{t}$ bağıntısı vasıtasıyla belirlenmiştir. Kılcal geçirimsizlik katsayısının belirlenmesinde Excel programı kullanılıp lineer regresyon yapılarak kılcallık katsayıları belirlenmiştir.

2.4.2.4. Basınç Dayanımı

Önceden hazırlanmış 15 cm boyutlu küp numuneler tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak basınç dayanımı değeri belirlenmiştir. Basınç dayanımının deneyi TS EN 196-1'e göre gerçekleştirilmiştir [80]. Basınç dayanımı deneyi 28 gününü doldurmuş numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneyde kullanılan 250 ton kapasiteli basınç dayanımı deneyi cihazı Şekil 2.16'da verilmektedir.



Şekil 2.16. Basınç dayanımı test cihazı

2.4.2.5. Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık Deneyi

Numuneler 28 günlük standart su kürü sonrası yüzeyleri kurutularak havada ve suda tartımlar yapıp numunenin havada ve su içinde asılı ağırlıkları belirlenmiş ve birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Numunelerin havada ve suda tartım yapıldıkları terazi ve ayrıca beton üretiminde malzemelerin tartıldığı terazi Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2. 17. Birim ağırlık için kullanılan terazi

3. BULGULAR

Üretilen betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneylere ilişkin sonuçlar çizelgeler halinde bu bölümde aktarılmıştır.

3.1. Taze Beton Deneyleri

3.1.1. Çökme Deneyi Sonuçları

Araştırma kapsamında üretilen betonların tümü için taze halde iken çökme değerleri ölçülmüştür. Tüm karışımlar için hedef çökme 6 cm belirlenmiş olup bunu gerçekleştirmek için süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Ölçülen çökme değerleri ve kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı/toplam bağlayıcı miktarları Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Çökme değerleri ve akışkanlaştırıcı katkı oranları

Beton Türü	Çökme (cm)	Akışkanlaştırıcı/ Toplam Bağlayıcı (%)
B290Ş	6	1.92
B290UK10	10	1.81
B290UK20	7	1.69
B290UK30	5.5	1.26
B290SD5	14	2.76
B290SD10	4.5	2.48
B290SD15	3	2.34
B340Ş	6.5	1.29
B340UK10	6	1.23
B340UK20	6	1.01
B340UK30	6.5	0.85
B340SD5	5	1.61
B340SD10	5	1.38
B340SD15	5	2.21

3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.2.1. Hızlı Klorür Geçirirliği Deney Sonuçları

ASTM C 1202'ye göre betonların hızlı klorür geçirirliği sınıflaması Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. ASTM C 1202'ye göre klorür geçirirlik sınıflaması

Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirirlik Sınıfı
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Üretilen betonlar üzerinde 28 günlük kür sonunda gerçekleştirilen hızlı klorür geçirirliği deneyi sonucu elde edilen ölçümler ve ASTM C 1202 standardına göre yapılan hızlı klorür geçirirliği sınıflaması Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.3. Hızlı klorür geçirirliği deney sonuçları (28 günlük)

Beton Türü	Yük (Coulomb)	Geçirgenlik Sınıfı
B290Ş	5974	Yüksek
B290UK10	6295	Yüksek
B290UK20	5027	Yüksek
B290UK30	4793	Yüksek
B290SD5	2395	Orta
B290SD10	1477	Düşük
B290SD15	844	Çok Düşük
B340Ş	7998	Yüksek
B340UK10	6598	Yüksek
B340UK20	6375	Yüksek
B340UK30	3218	Orta
B340SD5	2485	Orta
B340SD10	1315	Düşük
B340SD15	941	Çok Düşük

90 günlük kür sonunda gerçekleştirilen hızlı klorür deneyine ilişkin elde edilen ölçümler Tablo 3.3’de verilmektedir.

Tablo 3.4. Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları (90 günlük)

Beton Türü	Yük (Coulomb)	Geçirgenlik Sınıfı
B290Ş	4406	Yüksek
B290UK10	3151	Orta
B290UK20	1855	Düşük
B290UK30	1270	Düşük
B290SD5	1566	Düşük
B290SD10	1004	Düşük
B290SD15	550	Çok Düşük
B340Ş	4858	Yüksek
B340UK10	3717	Orta
B340UK20	1967	Düşük
B340UK30	1157	Düşük
B340SD5	1704	Düşük
B340SD10	1020	Düşük
B340SD15	664	Çok Düşük

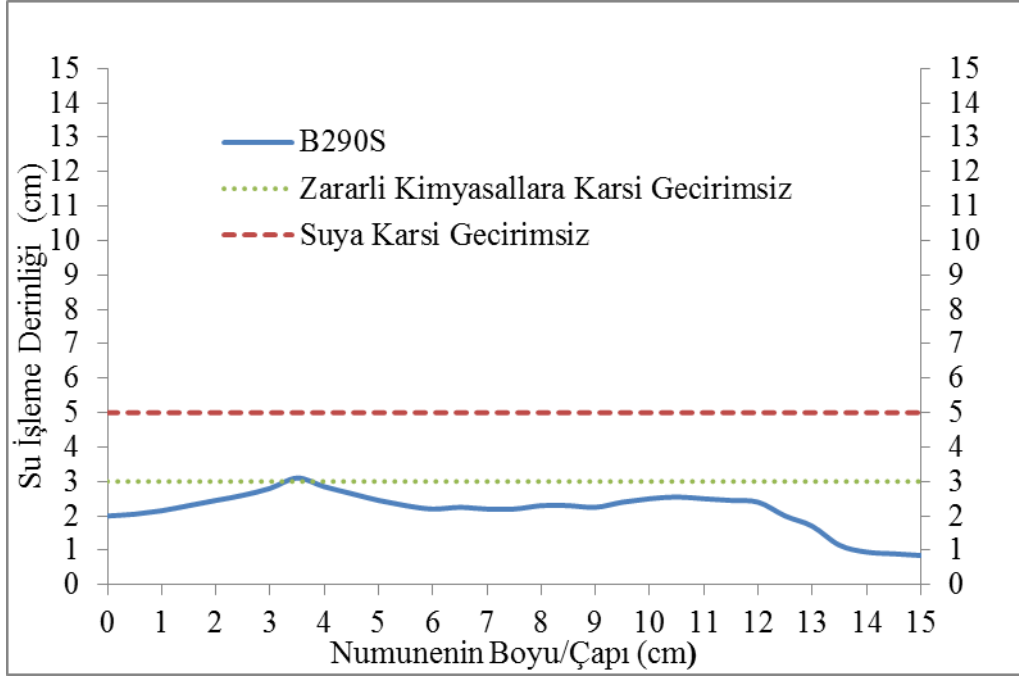
3.2.2. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları

Maksimum su işleme derinliği (MSİD)’ne göre TS EN 12390-8 standardı uyarınca yapılan sınıflama Tablo 3.5’de verilmektedir.

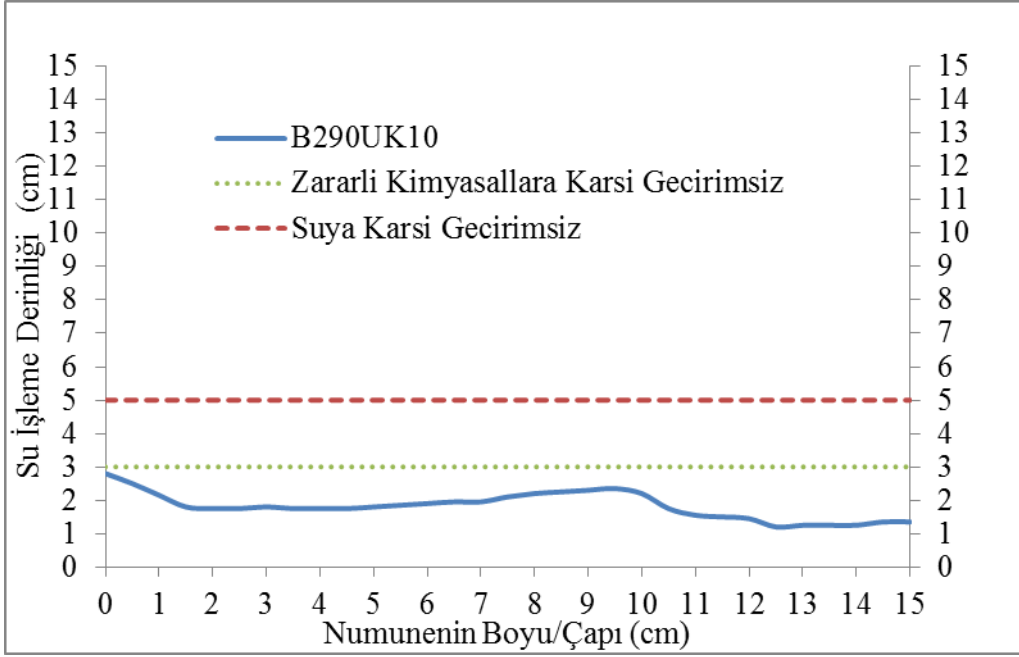
Tablo 3.5. Betonda su işleme derinliğinin değerlendirilmesine ilişkin kriterler

Maksimum Su İşleme Derinliği (mm)	Betonun Geçirimsizlik Sınıfı
>50	Geçirimsiz Beton
<50	Geçirimsiz Beton
<30	Zararlı Ortamlara Karşı Geçirimsiz Beton

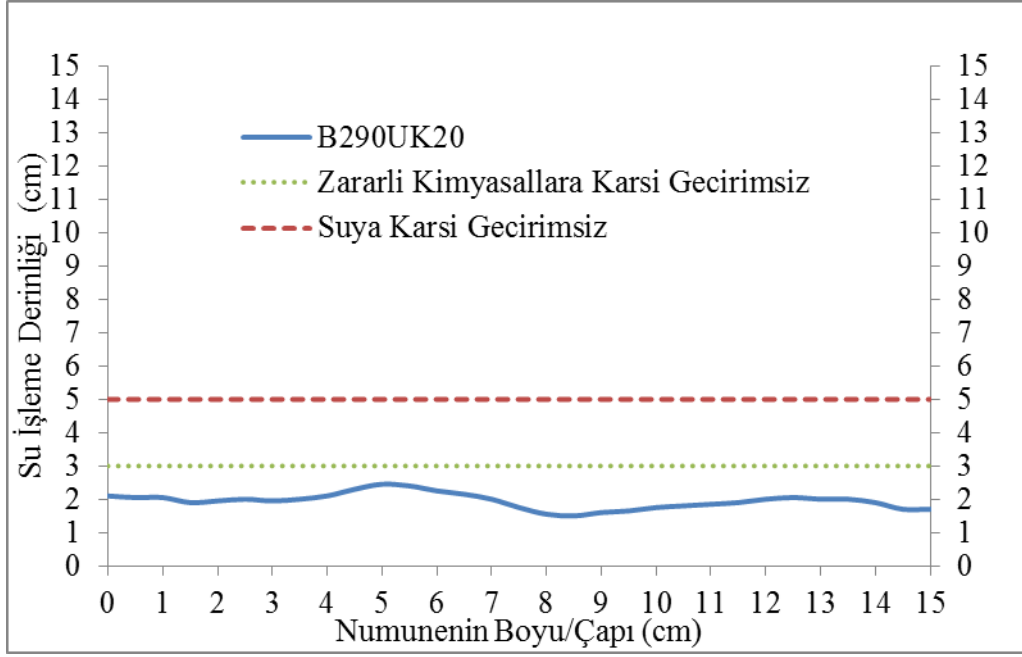
Üretilen her beton serisi için dijital ortamda su işleme derinliği profilleri temsili olarak Şekil 3.1 ile Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



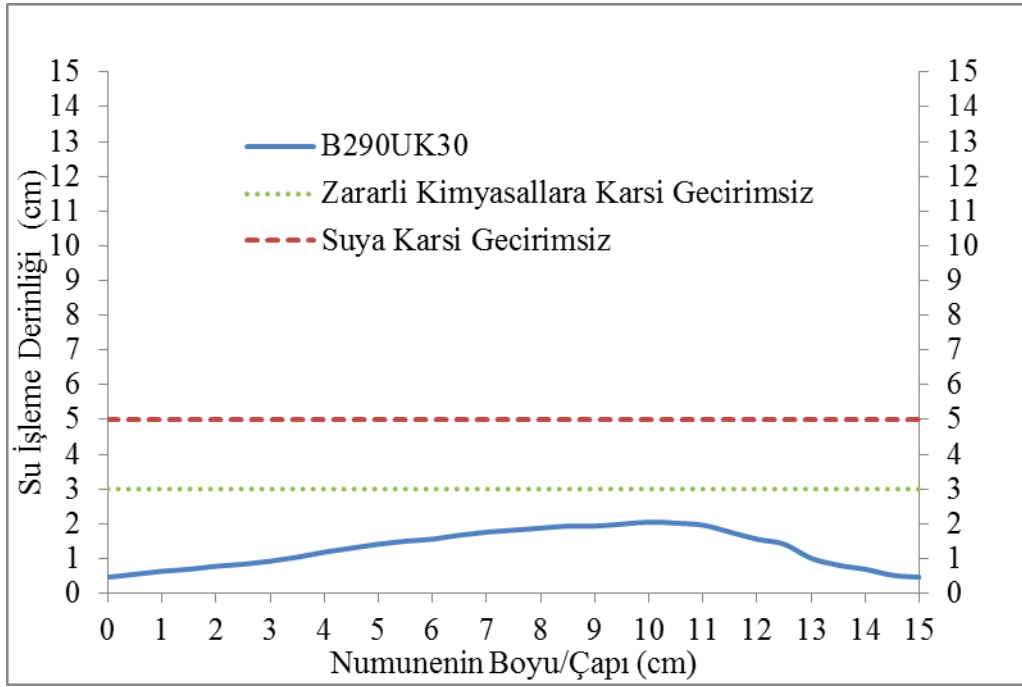
Şekil 3.1. B290Ş kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



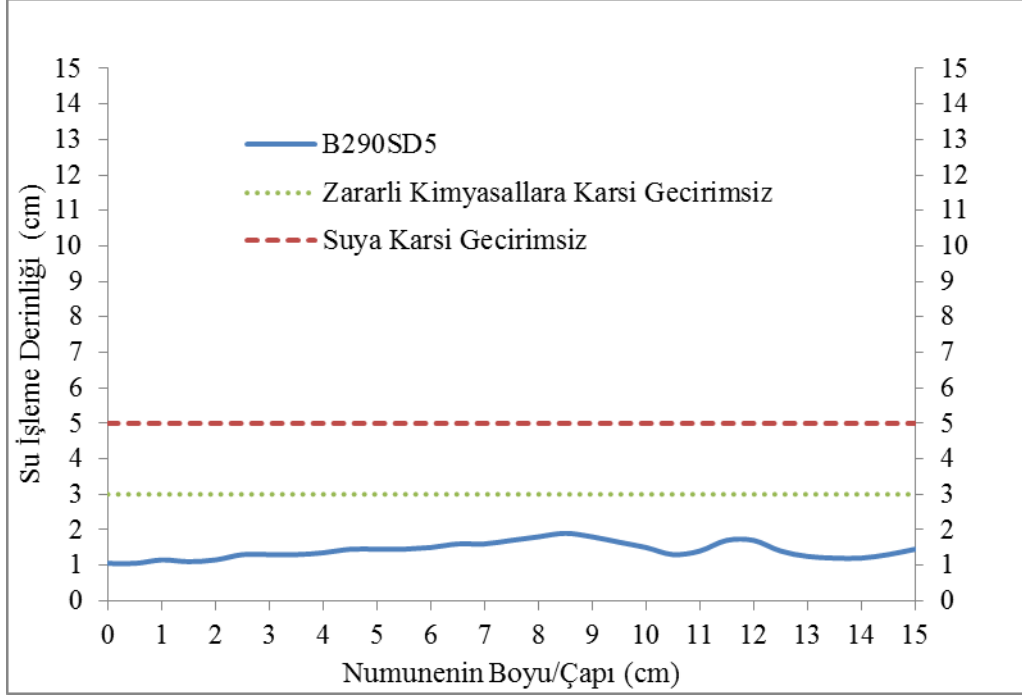
Şekil 3.2. B290UK10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



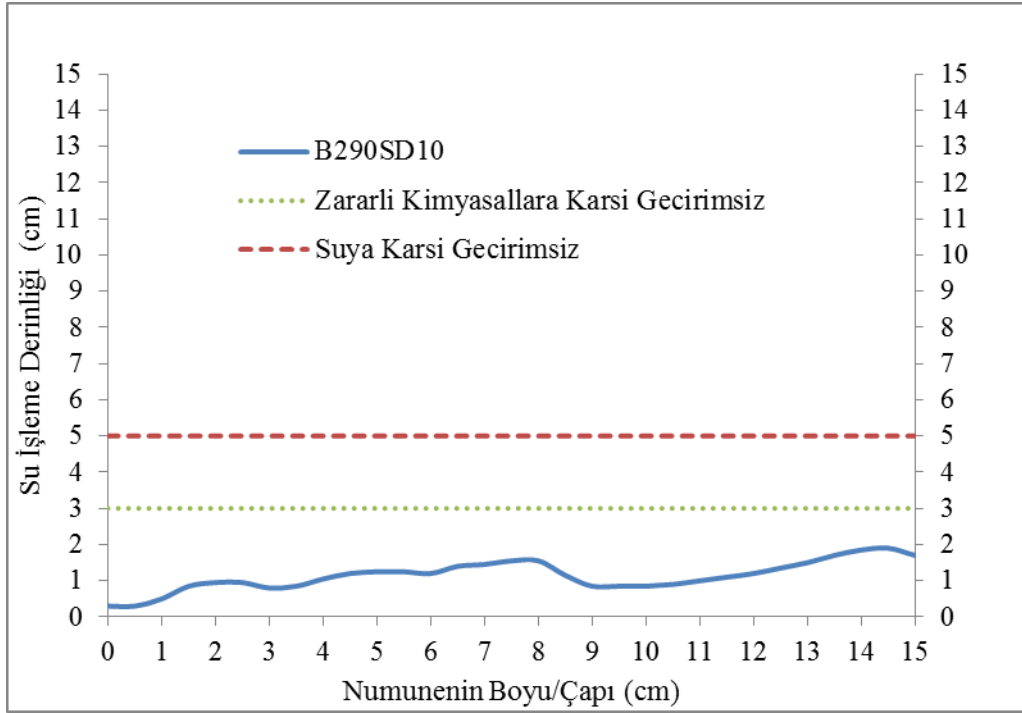
Şekil 3.3. B290UK20 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



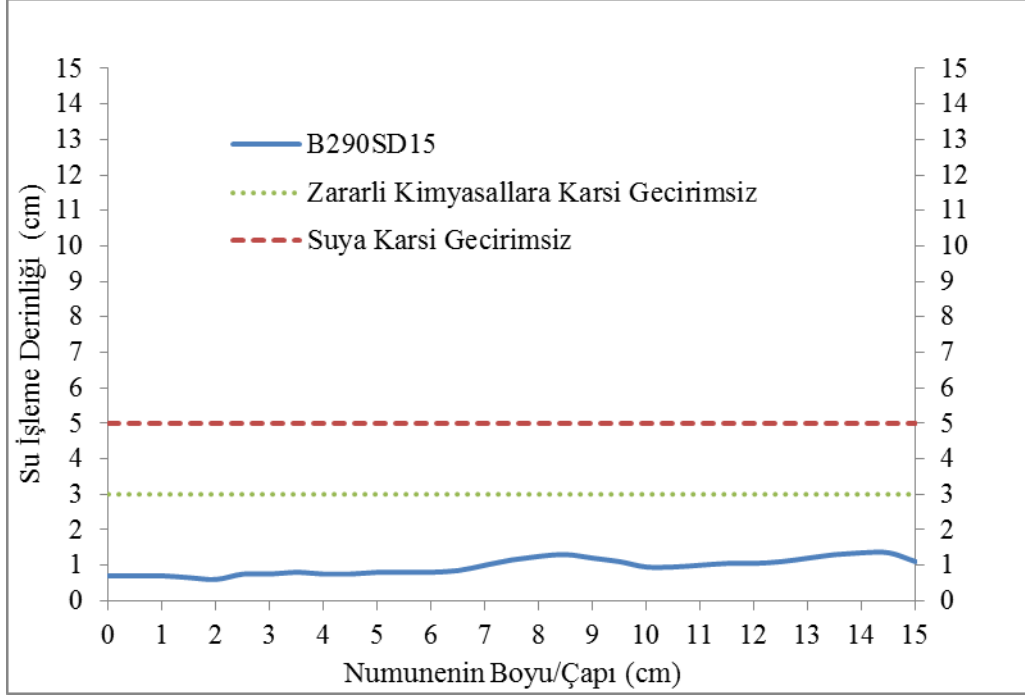
Şekil 3.4. B290UK30 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



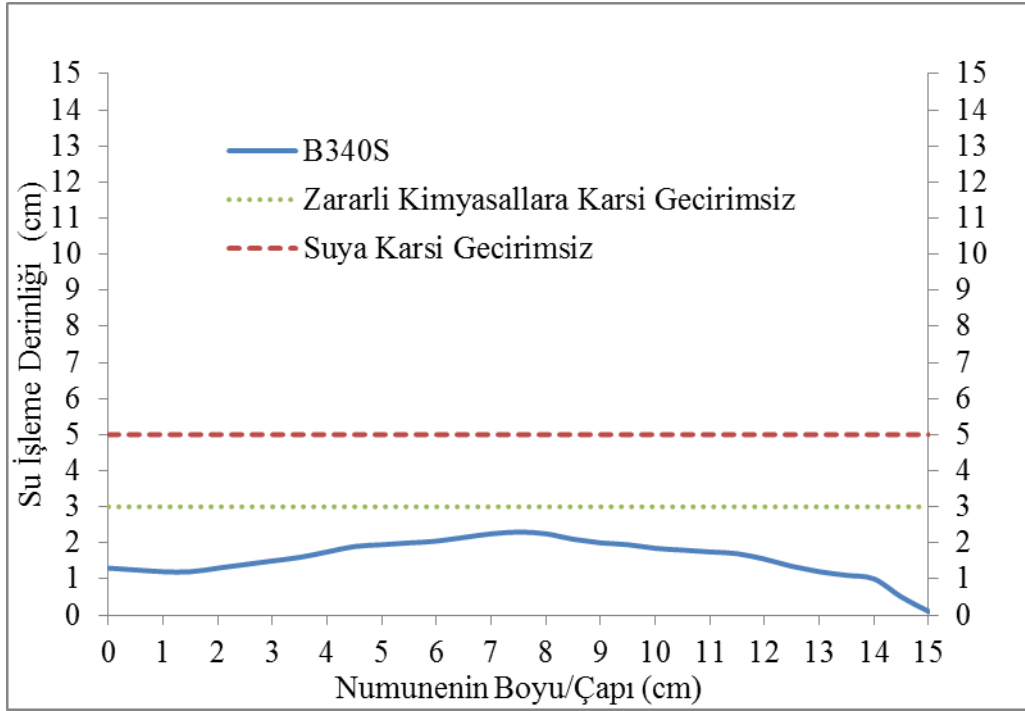
Şekil 3.5. B290SD5 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



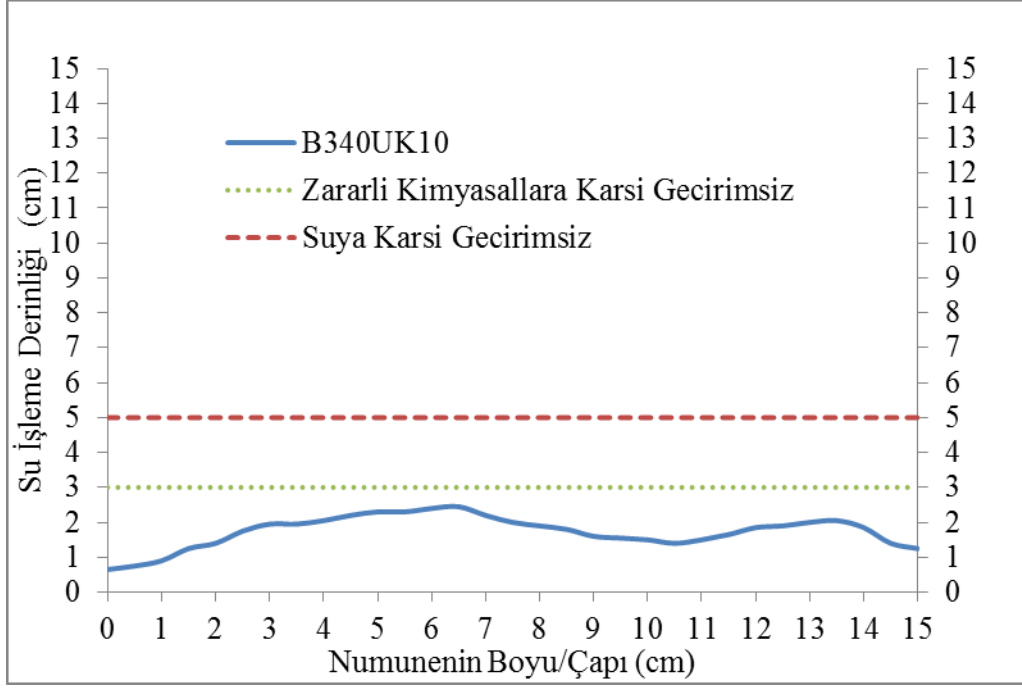
Şekil 3.6. B290SD10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



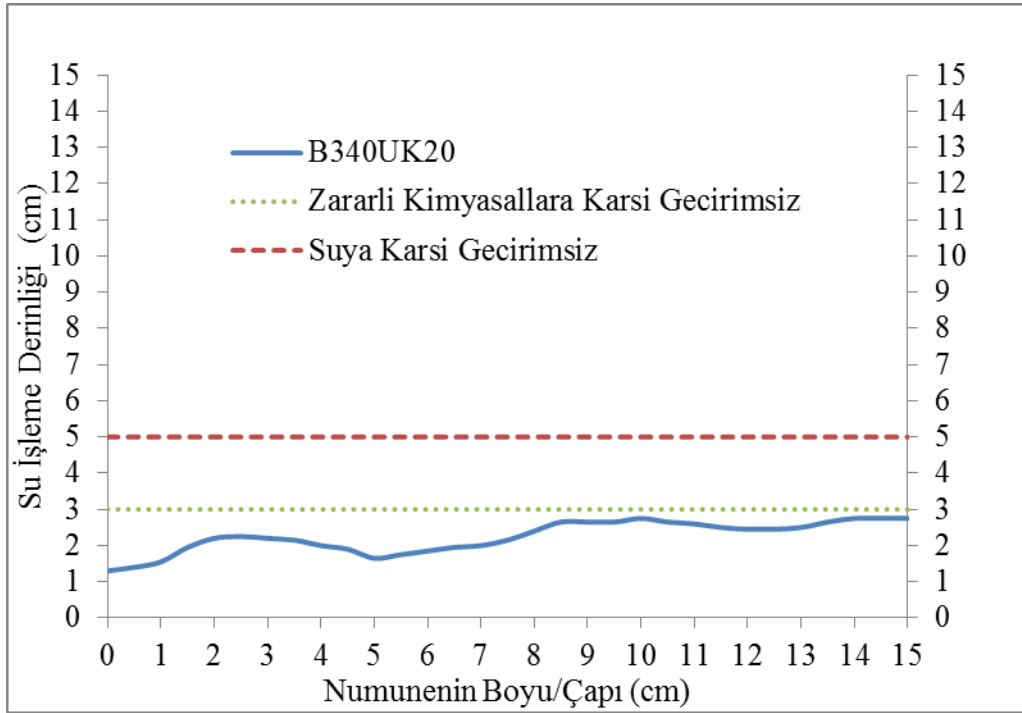
Şekil 3.7. B290SD15 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



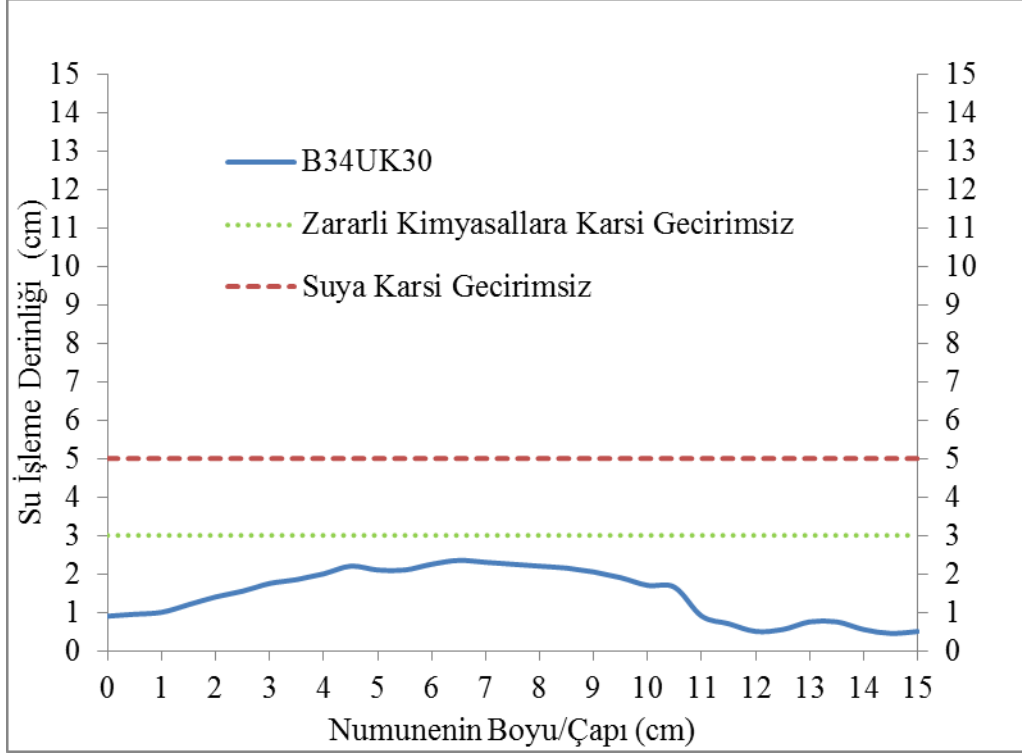
Şekil 3.8. B340S kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



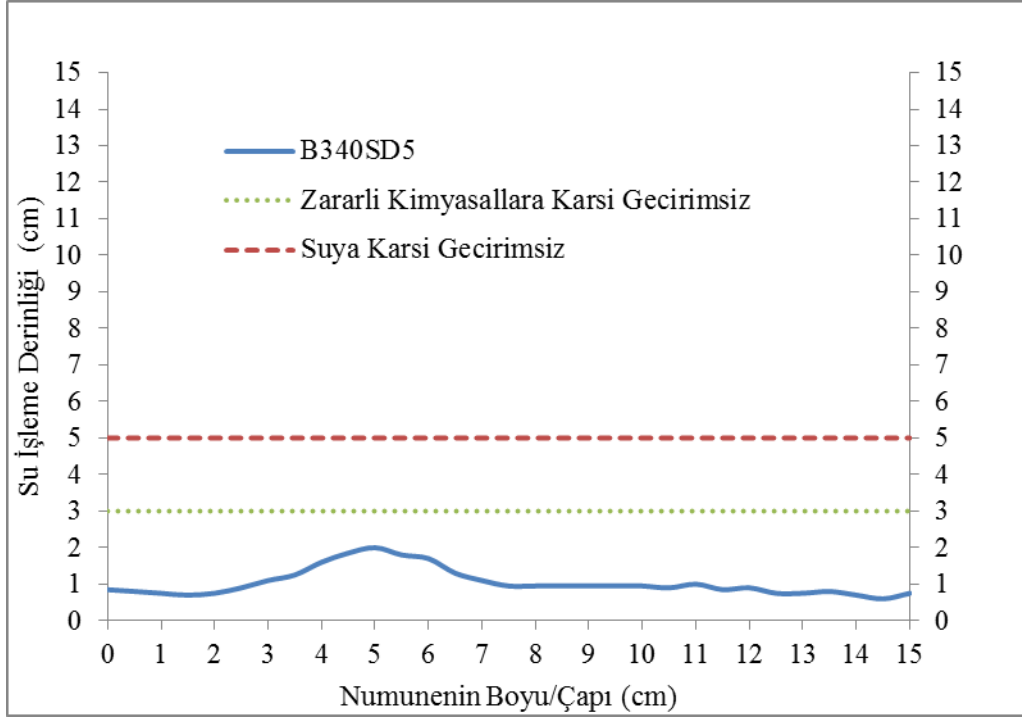
Şekil 3.9. B340UK10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



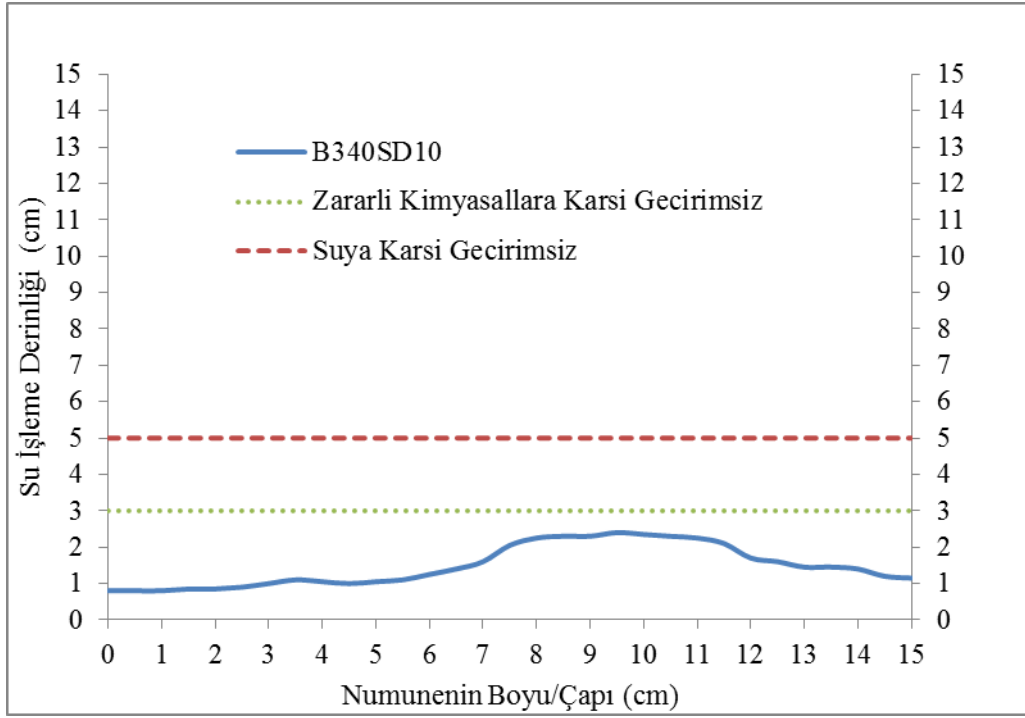
Şekil 3.10. B340UK20 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



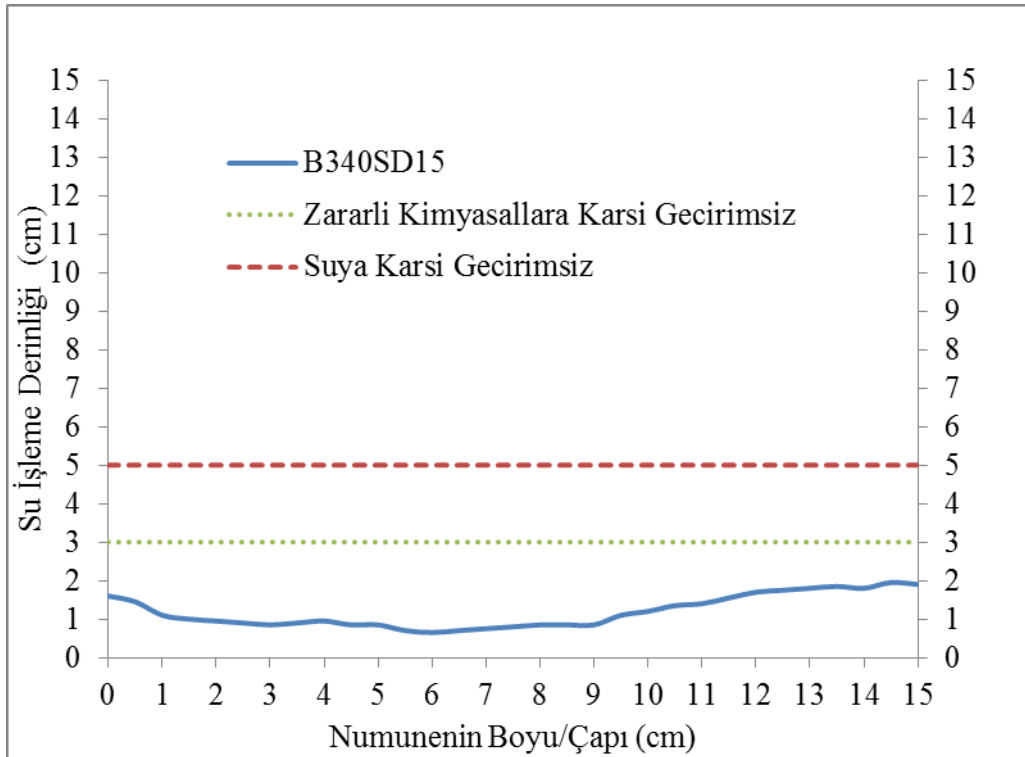
Şekil 3.11. B340UK30 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



Şekil 3.12. B340SD5 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



Şekil 3.13. B340SD10 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili



Şekil 3.14. B340SD15 kodlu numunenin temsili su işleme derinliği profili

Üretimlere ait maksimum su işleme derinlikleri (MSİD), ortalama su işleme derinlikleri (OSİD) ve ilgili standarda göre betonun geçirimsizlik sınıfı Tablo 3.6.'da verilmektedir. Çizelgede ZOKGB olarak verilen kısaltma “Zararlı Ortamlara Karşı Geçirimsiz Beton” anlamındadır.

Tablo 3.6. Basınçlı su geçirimsizliği deneyine ilişkin sonuçlar

Beton Türü	MSİD (mm)	OSİD (mm)	Geçirimsizlik Sınıfı
B290Ş	31.0	21.9	Geçirimsiz Beton
B290UK10	28.0	18.2	ZOKGB
B290UK20	24.5	19.5	ZOKGB
B290UK30	20.5	12.9	ZOKGB
B290SD5	19.0	14.2	ZOKGB
B290SD10	19.0	11.4	ZOKGB
B290SD15	13.5	9.6	ZOKGB
B340Ş	23.0	15.9	ZOKGB
B340UK10	24.5	17.3	ZOKGB
B340UK20	27.5	22.4	ZOKGB
B340UK30	23.5	14.7	ZOKGB
B340SD5	20.0	10.4	ZOKGB
B340SD10	24.0	14.8	ZOKGB
B340SD15	19.5	11.9	ZOKGB

3.2.3. Kılcal Su Geçirimsizliği Deney Sonuçları

ASTM C 1585 standardı esas alınarak gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi sonuçlarına uygulanan lineer regresyon ile elde edilen kılcallık katsayıları Tablo 3.7'de verilmektedir.

Tablo 3.7. Beton karışımları için ölçülen kılcallık katsayıları

Beton Türü	Kılcallık Katsayısı (cm ² /s)x10 ⁻⁶
B290Ş	3.07
B290UK10	3.06
B290UK20	3.32
B290UK30	2.88
B290SD5	1.33
B290SD10	0.88
B290SD15	0.60
B340Ş	3.81
B340UK10	3.42
B340UK20	3.47
B340UK30	2.59
B340SD5	1.49
B340SD10	1.12
B340SD15	0.80

3.2.4. Betonların Birim Ağırlıkları ve Basınç Dayanımları

Beton karışımları üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneyine ait sonuçlar ve sertleşmiş beton birim ağırlıkları Tablo 3.8’de verilmektedir.

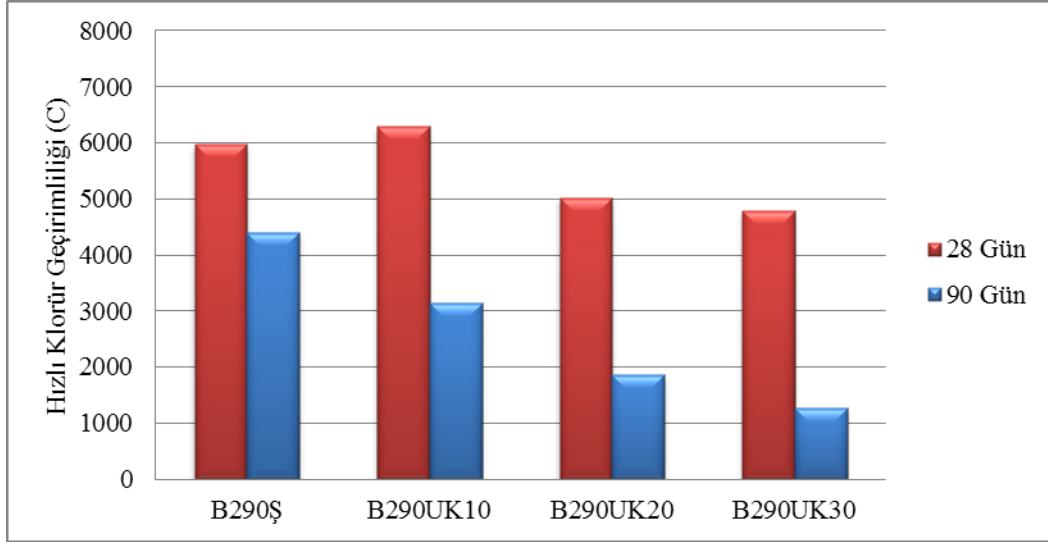
Tablo 3.8. Basınç dayanımı sonuçları ve sertleşmiş birim ağırlıklar

Beton Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık (kg/m ³)
B290Ş	37.06	2456
B290UK10	35.82	2465
B290UK20	29.58	2458
B290UK30	25.66	2443
B290SD5	42.42	2488
B290SD10	41.22	2477
B290SD15	46.39	2492
B340Ş	39.06	2433
B340UK10	34.61	2422
B340UK20	30.07	2409
B340UK30	30.26	2424
B340SD5	41.57	2457
B340SD10	43.31	2436
B340SD15	47.64	2431

4. İRDELEME

4.1. Hızlı Klorür Geçirimsizliği

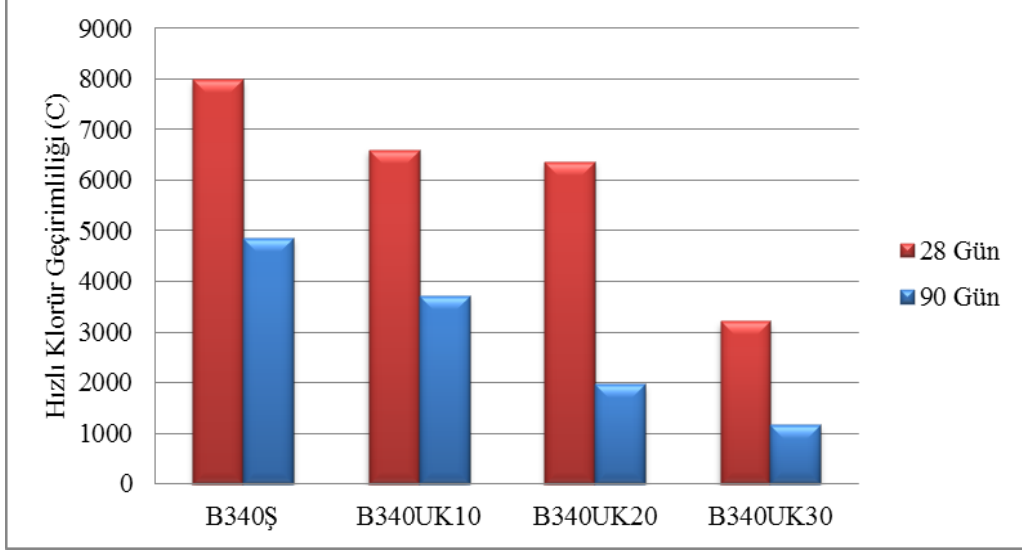
Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için uçucu kül ikameli beton karışımlarına ilişkin ASTM C 1202 standardı uyarınca gerçekleştirilen hızlı klorür geçirimsizliği ölçümleri Şekil 4.1'de verilmektedir. İlgili standart uyarınca ölçülen elektriksel yükün 2000 Coulomb'dan küçük olması söz konusu betonun klorür geçirimsizliğinin düşük olması anlamına gelmektedir.



Şekil 4.1. Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için uçucu kül ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri

Bu bağlamda Şekil 4.1 incelendiğinde toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan beton karışımları için uçucu kül ikamesinin etkisinin 90 günlük kür süresi sonunda minimum %20 ikame oranında ortaya çıktığı görülmektedir. Burada bağlayıcı dozajı düşük karışımlarda uçucu külün etkisinin kür süresinin uzun olması durumunda ancak ortaya çıktığı göze çarpmaktadır. Uçucu kül kullanılmayan betonların klorür geçirgenliklerinin ilgili standart kapsamında her iki kür süresi için de yüksek düzeyde ($>4000 \text{ C}$) kaldığı görülmektedir. Bu sonuç betonlarda uçucu kül kullanımının klorür geçirimsizliğine etkisinin olumlu olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.1’de 28 günlük kür süresi sonunda B290UK30 ile B290Ş betonları arasında klorür geçirimsizliği açısından yaklaşık %20 oranında azalma yönünde bir fark göze çarparken 90 günlük kür süresi sonunda bu oranın %70 civarında gerçekleşmiş olduğu görülmektedir. Yani uçucu kül ikameli betonlarda kür süresinin uzun olmasının klorür geçirimsizliği açısından olumlu etkisi daha da belirginleşmektedir.



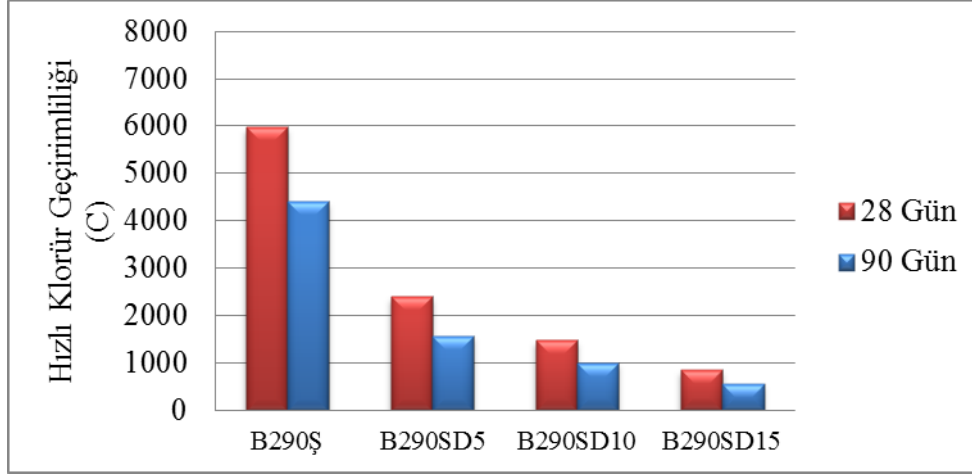
Şekil 4.2. Toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 için uçucu kül ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri

Şekil 4.2 incelendiğinde 28 gün kür süresi sonunda yalnızca B340UK30 betonunun klorür geçirimsizliği itibariyle orta sınıf olduğu görülmektedir. Kür süresinin 90 gün olması halinde şahit betonlar klorür geçirimsizliği itibariyle yüksek sınıf olmasına karşın B340UK10 betonunun orta sınıf, B340UK20 ve B340UK30 betonlarının da düşük sınıf oldukları görülmektedir. 28 gün kür sonunda B340UK30 betonunun klorür geçirimsizliği B340Ş betonuna göre yaklaşık %60 oranında azalmasına karşın 90 günlük kür süresi sonunda bu oran %76 civarındadır.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 birlikte incelendiğinde şahit betonlar için bağlayıcı miktarının 290 kg/m^3 ’den 340 kg/m^3 ’e çıkması ile beklenen aksine klorür geçirimsizliği değerlerinin de artmış olduğu görülmektedir. 28 gün kür gören 340 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonlarda uçucu kül ikamesi artışı ile klor geçirimsizlik değerlerinin 290 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonlardan daha belirgin bir biçimde azaldığı görülmektedir. 90 günlük kür süresi

sonunda hem 290 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonların hem 340 kg/m^3 bağlayıcı içeren betonların klorür geçirimsizliği itibariyle benzer eğilim göstermektedir.

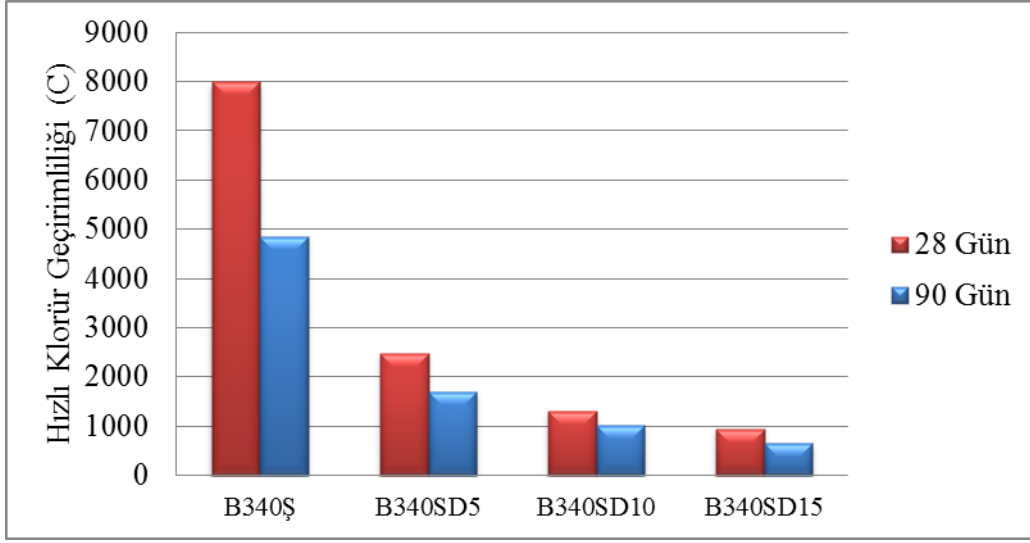
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 silis dumanı ikame edilerek üretilen betonların hızlı klorür geçirimsizliklerine ilişkin ölçülen değerleri içermektedir.



Şekil 4.3. Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için silis dumanı ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri

Şekil 4.3 incelendiğinde 28 gün kür sonunda yalnızca B290SD5'in şahit numuneye göre klorür geçirimsizliğinde %60 oranında bir azalma göstermiş olduğu ve klorür geçirimsizliği itibariyle orta sınıf olduğu görülmektedir. B290SD15 betonunun klorür geçirimsizliği değerinin şahit betonun klorür geçirimsizliği değerine göre %85 civarında azaldığı görülmektedir. Silis dumanı ikameli betonların 28 günlük kür sonunda klorür geçirimsizliği açısından düşük sınıf kategorisinde yer alması için ikame oranının en az %10 olması gerektiği görülmektedir.

Şekil 4.3'de 90 günlük kür süresi göz önüne alındığında silis dumanı ikameli betonların tümünün klorür geçirimsizliği itibariyle düşük sınıf kategorisinde yer aldığı hatta B290SD15 betonun klorür geçirimsizliğinin çok düşük olduğu görülmektedir. 90 günlük kür süresi itibariyle şahit numuneye göre klorür geçirimsizliklerindeki azalma B290SD5 betonu için %65 ve B290SD10 betonu için %77 iken B290SD15 betonu için %88 civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 için silis dumanı ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri

Şekil 4.4 incelendiğinde silis dumanı ikamesinin betonların klorür geçirimsizlikleri üzerindeki etkisinin toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan betonlarınkine çok benzer olduğu görülmektedir. 28 günlük kür için klorür geçirimsizliklerinin şahit betona göre azalması B340SD5 betonu için %69 ve B340SD10 betonu için %83 iken B340SD15 betonu için ise %88 civarındadır. 90 gün kür gören betonlar için benzer değerlendirme yapıldığında klorür geçirimsizliğindeki azalmanın B340SD5 betonu için %65 ve B340SD10 betonu için %79 iken B340SD15 betonu için ise %86 mertebesindedir.

Tüm betonların hızlı klorür geçirimsizliği değerleri birlikte ele alındığında klorür geçirimsizliğini azaltmada silis dumanının uçucu küle üstünlüğü belirgin bir şekilde görülebilir. 28 günlük kür süresine ilişkin ölçümler dikkate alındığında uçucu kül ikameli betonların klorür geçirimsizliği itibariyle hiçbiri düşük sınıf kategorisine girmezken yalnızca B340UK30 betonu klorür geçirimsizliği itibariyle orta sınıf kategorisine girmektedir. Ancak yine 28 gün kür gören B290SD10, B290SD15, B340SD10 ve B340SD15 betonları klorür geçirimsizliği itibariyle düşük sınıf kategorisine girmektedir.

90 günlük kür uygulanan numuneler incelendiğinde yine uçucu kül ikameli betonların klorür geçirimsizlik değerlerinin oldukça azaldığı görülmektedir. 90 gün kür gören B290UK20, B290UK30, B340UK20 ve B340UK30 betonların klorür geçirimsizliği itibariyle düşük sınıf kategorisine girdiği görülmektedir. 90 gün su kürü gören silis dumanı ikameli betonlardan %5 silis dumanı ikameli betonların dahi klorür geçirimsizliği itibariyle düşük sınıf kategorisine girdiği görülmektedir.

Yapılan birçok çalışmada mineral katkıların çimento ile ikame veya ilave olarak kullanımının hızlı klorür geçirimsizliği, maksimum su işleme derinliği, kılcallık katsayısı değerlerini düşürdüğü görülmektedir.

Yapılan bir çalışmada [45] su/bağlayıcı oranı 0.50 ve toplam bağlayıcı miktarı 330 kg/m³ için uçucu külün eşdeğerlik katsayısı 0.4 ve silis dumanının eşdeğerlik katsayısı 2 alınarak beton karışımları hazırlanmıştır. Bu şekilde yaklaşık %10 uçucu kül ve %13 silis dumanı ikame edilerek betonlar üretilmiştir. Katkısız betonların klorür geçirimsizliği 5650 C'dan uçucu kül ikameli olanlarda 2986 C'a silis dumanı ikameli olanlarda 2653 C'a düştüğü görülmüştür. Çalışmamızdaki hızlı klorür geçirimsizlik sonuçları bu çalışmaya göre uçucu kül ikameliler bu etkiyi göstermemesine rağmen silis dumanı ikamelilerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

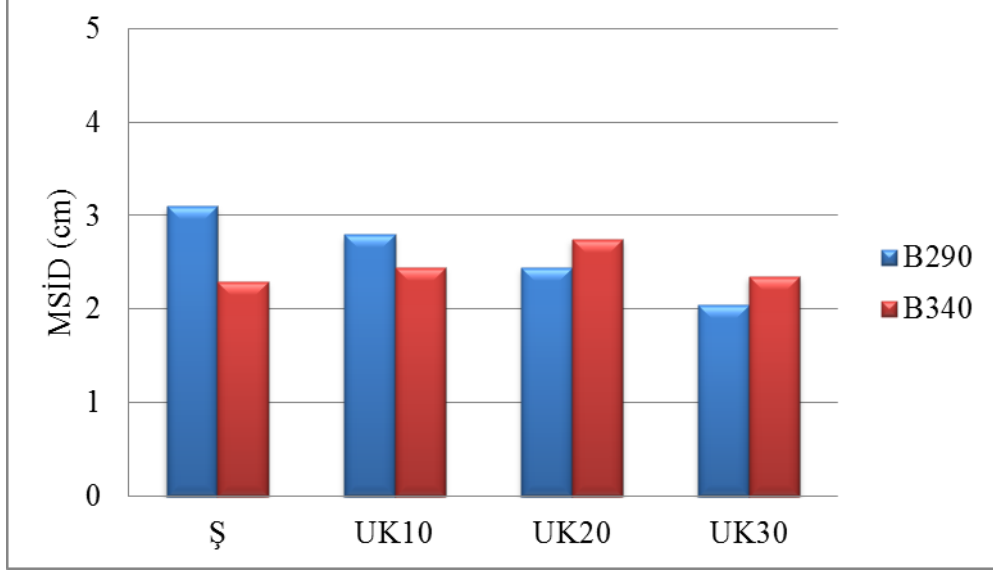
Başka bir çalışmada [54] %10, %30, %50 ve %70 oranlarında uçucu kül ikameli kendiliğinden yerleşen betonlar üretilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlarda %30 oranında uçucu kül ikamesinin gerek dayanım gerekse dayanıklılık açısından en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Hem toplam bağlayıcı miktarının yüksek olması (550 kg/m³) hem de su/bağlayıcı oranının düşük olması nedeniyle dayanım ve dayanıklılık açısından büyük farklar ortaya çıktığı görülmektedir. Çalışmadan elde edilen en göze çarpan sonucun çok zor koşullarda inşa edilen yapılar için yüksek performanslı betonun oldukça uygun olduğudur. Farkın ne denli büyük olduğunu anlamak için her iki çalışmada da %30 oranında uçucu kül ikame edilen betonlarda (mevcut çalışmada 340 dozajlı betonlar için) mevcut çalışmaya göre hızlı klorür geçirimsizlikleri arasındaki farkın %70 civarında olduğu gösterilebilir.

Yapılan bir diğer çalışmada [47] farklı çimento tipleri farklı kür koşulları ve farklı su/çimento oranlarında bir takım harçlar üretilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada standart kür koşullarında kür gören 0.485 su/çimento oranına sahip harç numunelerin hızlı klorür geçirimsizliği mevcut çalışmadaki hızlı klorür geçirimsizliği değerleri yaklaşık olarak aynı seviyelerde çıktığı görülmüştür.

4.2. Basınç Altında Su İşleme Derinliği

Bu bölümde 72 saat süresince 5 bar basınçlı su uygulanan numunelerde maksimum su işleme derinlikleri (MSİD) ölçümüne ilişkin sonuçlar değerlendirilmiştir. Deneysel ölçümler 28 gün standart su kürü gören numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlgili

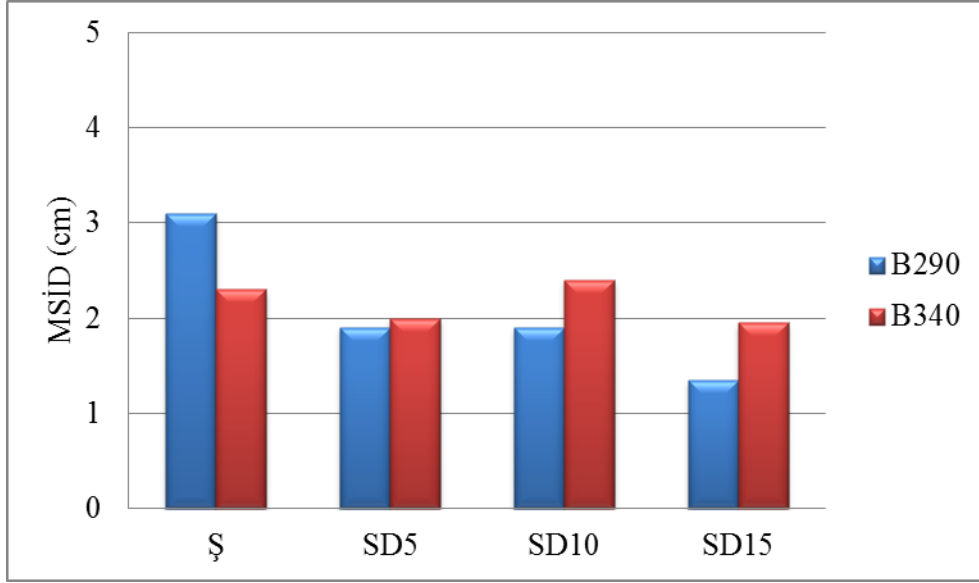
standarda göre bir betonun geçirimsiz beton olabilmesi için MSİD'nin 5 cm'den, zararlı ortamlara karşı geçirimsiz bir beton olabilmesi için de MSİD'nin 3 cm'den küçük olması gerekmektedir.



Şekil 4.5. Uçucu kül ikameli betonlarda maksimum su işeme derinlikleri

Şekil 4.5 uçucu kül ikameli ve şahit betonlara ait MSİD ölçümlerini vermektedir. Grafiklerde yandaki seri ismi ile alttaki isimler birleştirilmesi ilgili betonun kodunu gösterir.

Şekil 4.5' incelendiğinde B290Ş betonu hariç tüm betonlar ilgili standarda göre zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfına girmektedir. B290Ş ise geçirimsiz beton sınıfındadır. Bağlayıcı dozajı 290 kg/m^3 olan betonlarda uçucu kül ikamesinin artışı ile MSİD değerlerinde hatırı sayılır düşme görülmektedir. Ancak bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonlar için benzer eğilimden söz etmek olası değildir. Uçucu kül ikamesine bağlı olarak MSİD ölçümlerinde gerek azalma yönünde gerekse artma yönünde belirgin bir eğilim göze çarpmamaktadır.



Şekil 4.6. Silis dumanı ikameli betonlarda maksimum su işeme derinlikleri

Şekil 4.6 incelendiğinde Şekil 4.5'e benzer bir eğilimin varlığı göze çarpmaktadır. Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan betonlarda MSİD ölçümü silis dumanı ikamesi ile genellikle azalan bir eğilim gözlemlenmesine karşın toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonlar için bir azalmadan veya artıştan söz etmek mümkün gözükmemektedir. Silis dumanı ikameli betonların ilgili standart uyarınca zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfında olduğunu söylemek mümkündür.

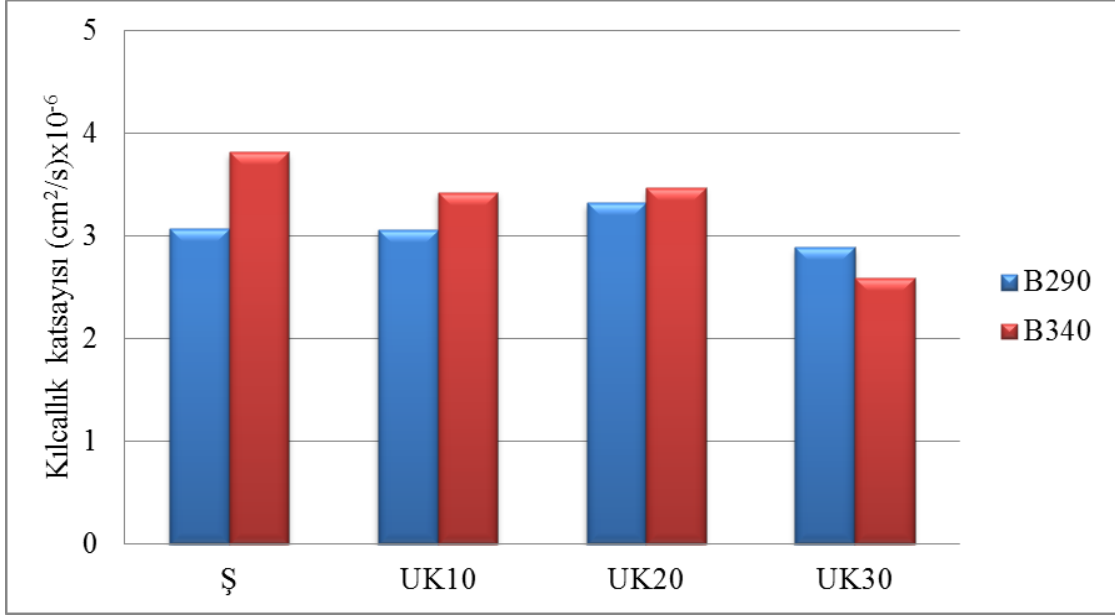
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 birlikte incelendiğinde hem uçucu kül hem de silis dumanı ikamesinin genel olarak MSİD değerlerini azalttığını söylemek olasıdır. B290Ş ve B340Ş şahit betonlarının MSİD değerlerine bakıldığında bağlayıcı miktarının artması ile MSİD değerinin azaldığı görülür. Fakat artan mineral katkı ikamesinin düşük bağlayıcı içeren betonun MSİD değerinin azalması açısından daha etkili olduğu görülmektedir. Genel manada silis dumanı ikameli betonlar üzerinde ölçülen MSİD değerlerinin daha çok düşük olduğu görülmektedir.

Bu deneyin doğası gereği betonda herhangi küçük bir çatlak veya homojensizliğin olması ölçülen MSİD değeri üzerinde oldukça etkili olabilmektedir. 5 bar basınçlı suyun küçük bir çatlak boyunca ilerlemesi ve çatlak etrafında yayılması betonun gerçek maksimum su işleme derinliği değerine ilişkin değerlendirme açısından yanıltıcı olabilir.

Yapılan bir çalışmada [45] uçucu kül ikamesinin MSİD değerine etkisi pek olmazken (17 mm'den 16 mm'ye azalma) mevcut çalışmada da benzer eğilim gözlemlenmiştir.

4.3. Kılcal Su Geçirirliği

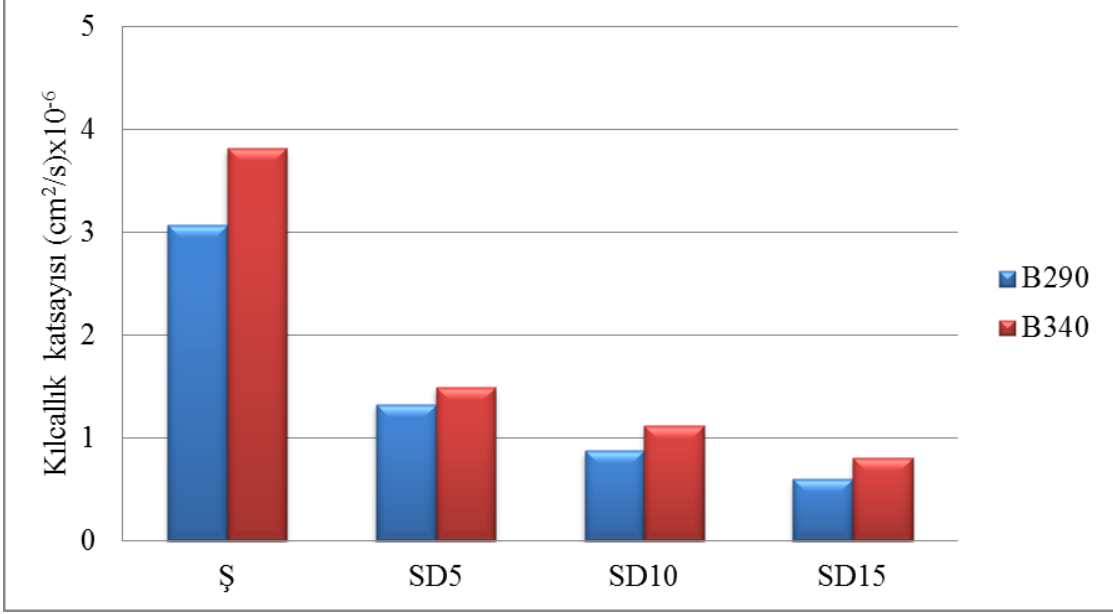
Kılcal su geçirirliği deneyi 28 gün süresince standart su kr gören betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül ve silis dumanı ikameli betonlar için elde edilen kılcallık katsayıları grafikler halinde sırasıyla şekil 4.7 ve şekil 4.8`de verilmektedir.



şekil 4.7. Uçucu kül ikameli betonlar için ölçülen kılcallık katsayıları

şekil 4.7 uçucu kül ikameli betonlarda kül ikame oranına bağlı olarak kılcal su emme değerinin değişimi görülmektedir. şekil 4.7 incelendiğinde her iki bağlayıcı miktarı için geçerli olmak üzere %10 ve %20 uçucu kül ikame edildiğinde kılcal geirirlik açısından önemli bir değişkenlik gözlemlenmezken %30 uçucu kül ikamesinde kılcal geirirlik değerindeki azalma belirginleşmektedir. Bunun anlamı şahit betona kıyasla kılcal geirirlikte belirgin bir azalma sağlamak ancak en az %30 uçucu kül ikamesi ile mümkün olabilmektedir. Diğer önemli bir sonucun şahit betonlarda kılcallık katsayısının beklenenin aksine toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m³ için daha düşük olduğudur. Bağlayıcı miktarı 340 kg/m³ için betonun kılcal geçirirliği artmaktadır. Ancak bağlayıcı miktarı 340 kg/m³ olan beton için uçucu kül ikamesi de yüksek tutulması halinde kılcallık katsayısındaki azalma bağlayıcı miktarı 290 kg/m³ olan betona göre belirginleşmektedir. Örneğin, B290Ş betonuna göre B290UK30 betonunun kılcallık katsayısı %6 oranında azalırken, B340Ş betonuna göre B340UK30 betonunun kılcallık katsayısındaki azalma

%32 mertebesine çıkmaktadır. Bu sonuç, bağlayıcı miktarına bağlı olarak ikame oranının artırılması kılcallık katsayısı üzerinde olan etkisini belirginleştirmektedir.



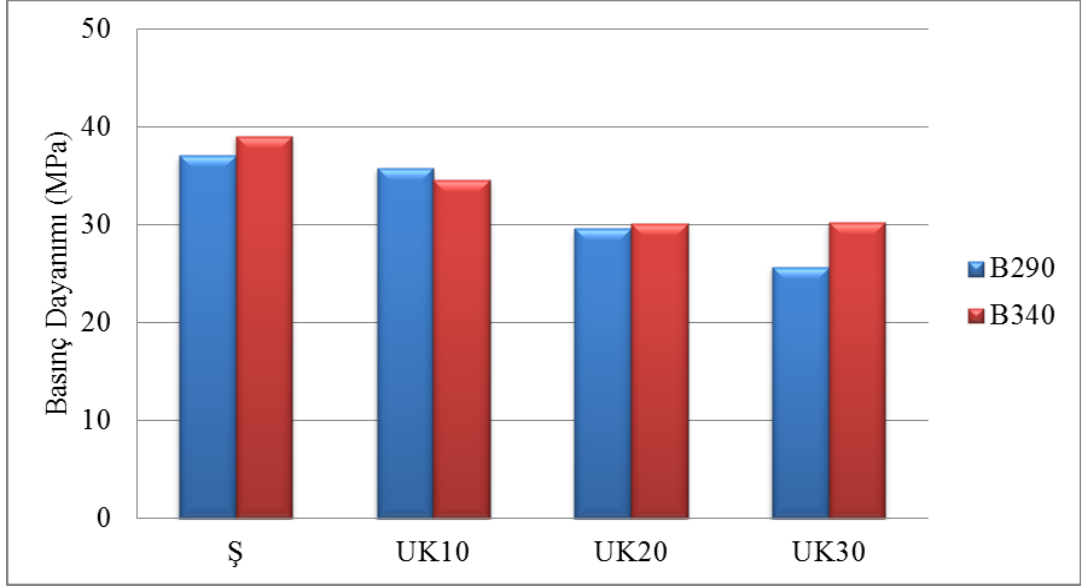
Şekil 4.8. Silis dumanı ikameli betonlar için ölçülen kılcallık katsayıları

Şekil 4.8`de silis dumanı ikameli betonların silis dumanı ikame oranına bağlı olarak kılcallık katsayılarının değişimi verilmektedir. Hem 290 kg/m³ dozajlı hem 340 kg/m³ dozajlı betonlar için artan ikame oranı ile kılcallık katsayısında belirgin bir azalma görülmektedir. Tüm ikame oranlarında 290 kg/m³ dozajlı betonların kılcal geçirimsizlik katsayıları 340 kg/m³ dozajlılara kıyasla daha düşüktür. Buradan bağlayıcı miktarının artması ile betonlarda oluşan kılcal çatlakların sayıca artmış olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. B290Ş betonuna göre B290SD15 betonunun kılcallık katsayısı %80 azalırken, B340Ş betonuna göre B340SD15 betonunun kılcallık katsayısındaki azalma %79 kadardır.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 birlikte değerlendirildiğinde, yalnızca %5 oranında silis dumanı ikamesi dahi kılcallık katsayısında %56'ya varan oranda bir azalma sağlarken, %30 uçucu kül ikamesi %32 oranında bir azalma sağlamaktadır. Burada silis dumanının kılcallık katsayısını azaltmada uçucu küle üstünlüğü açıkça görülmektedir. Her iki mineral katkı ikamesinde de 290 kg/m³ dozajlı betonların kılcallık katsayılarının daha küçük olduğu dikkat çekicidir.

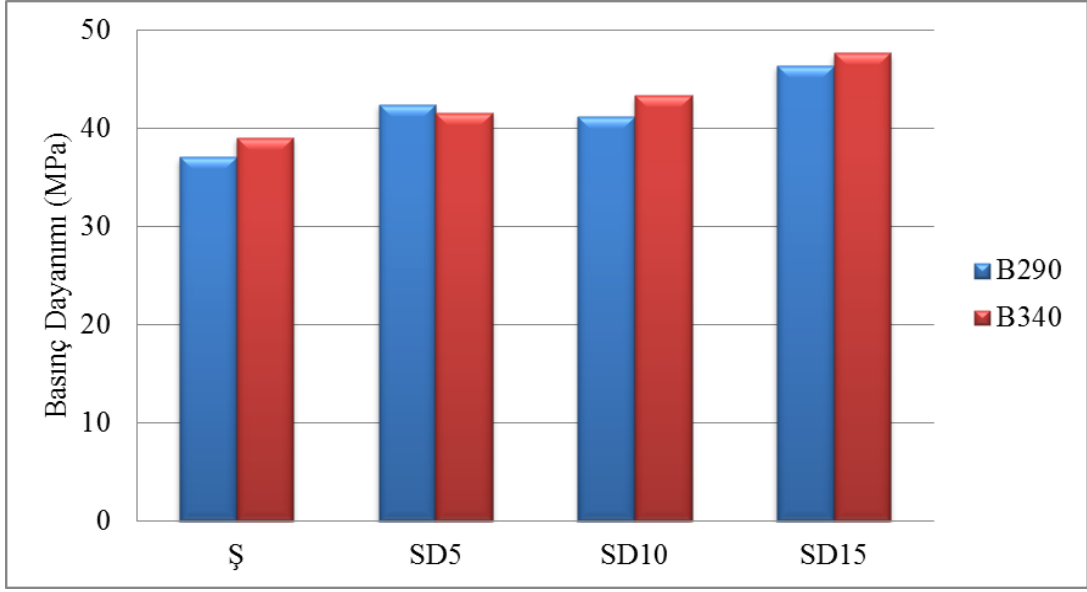
4.4. Basınç Dayanımı

28 gün standart kür gören beton karışımları üzerinde ölçülen basınç dayanımı değerleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10`da verilmektedir.



Şekil 4.9. Uçucu kül ikameli betonlar üzerinde ölçülen basınç dayanımları

Şekil 4.9 incelendiğinde artan uçucu kül ikamesi ile betonların basınç dayanımı değerlerinin toplam bağlayıcı miktarından bağımsız olarak azaldığı görülmektedir. Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için her %10`luk uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak şahit betona kıyasla dayanımlarda sırasıyla %8, %24 ve %34 oranlarında düşüşler meydana gelmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonlar için kayıplar sırasıyla %7, %19 ve %18 mertebesindedir. Uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak betonların basınç dayanımlarının artışı toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonlarda daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan betonlarda uçucu kül ikamesine bağlı olarak azalan çimento miktarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.10. Silis dumanı ikameli betonlar üzerinde ölçülen basınç dayanımları

Şekil 4.10`da silis dumanı ikamesi artışına bağlı olarak beton karışımlarının basınç dayanımlarının değişimi görülmektedir. Her %5 silis dumanı ikamesi artışının şahit betonlara göre neden olduğu basınç dayanımı artışı 290 kg/m^3 dozajlı betonlarda sırasıyla %9, %6 ve %19 iken 340 kg/m^3 dozajlı betonlarda %12, %17 ve %29 mertebesindedir. Toplam bağlayıcı miktarından bağımsız olarak silis dumanı ikamesi artışına bağlı olarak betonların basınç dayanımlarında belirgin bir artış görülmektedir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 birlikte incelendiğinde uçucu kül ikamesi artışına bağlı olarak betonların basınç dayanımları azalırken silis dumanı ikamesi artışına bağlı olarak artışı önemli bir sonuç olarak göze çarpmaktadır.

Yapılan bir çalışmada [45] 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin hem uçucu kül ikameli betonlarda hem silis dumanı ikameli betonlarda düştüğü görülmüştür. Mevcut çalışmada uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımları azalmasına karşın silis dumanı ikamelilerde belirgin bir artış görülmektedir.

Yapılan başka bir çalışmada [47] mineral katkı maddesi içermeyen betonların basınç dayanımı değerleri mevcut çalışmaya göre yaklaşık %50 civarında daha iyi sonuç verirken durabilite açısından yaptığımız çalışmaya benzer özellikler görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu farkın kıyaslanan çalışmada harç ve farklı su/çimento oranından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Başka bir çalışmada [46] ise uçucu kül ve silis dumanı ikame edilen betonların basınç dayanımlarının yükseldiği görülmüştür.

Görüldüğü gibi betonlarda mineral katkı kullanmanın basınç dayanımını tam olarak nasıl etkileyebileceği tam olarak öngörülememektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı betonlarda çimento ile ikame edilerek kullanılan uçucu kül ve silis dumanının betonların klorür geçirimsizlikleri ve su geçirimsizlik özellikleri ile basınç dayanımı üzerindeki etkisini belirlemektir. Çalışmadan elde edilen göze çarpan bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

1. Uçucu kül ve silis dumanının çimento ile ikame oranları arttıkça betonun hızlı klorür geçirimsizliği azalmaktadır. 28 günlük numuneler üzerinde yapılan hızlı klorür geçirimsizliği deneyine göre toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 için %30 oranında uçucu kül ikame edildiğinde dahi betonlar yüksek derecede klorür geçirimsizliği sınıfında yer alırken, toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olduğunda %30 uçucu kül ikame oranında betonlar orta derecede klorür geçirimsizliği sınıfına girmektedir. Betonun klorür geçirimsizliklerinde sağlanan azaltıcı etki itibariyle silis dumanı ikameli betonlar uçucu kül ikameli betonlara göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Her iki dozaj için de geçerli olmak üzere %5 oranında silis dumanı ikame edilen betonlar dahi klorür geçirimsizliği bakımından düşük derecede geçirimsizlik sınıfına girmişlerdir. Hatta %15 silis dumanı ikameli betonlar çok düşük derecede geçirimsizlik sınıfında yer almışlardır.
2. Kür süresi arttıkça betonların klorür geçirimsizliklerinde önemli düşüşler olmuştur. Her iki dozaj için geçerli olmak üzere 90 günlük kür sonunda uçucu kül ikameli betonların hızlı klorür geçirimsizlikleri %10 uçucu kül ikameli betonların orta derecede geçirimsizlik sınıfında yer aldığı, %20 ve %30 uçucu kül ikameli betonların ise düşük derecede geçirimsizlik sınıfında yer aldığı görülmüştür. Silis dumanı ikameli betonların 90 günlük kür süresi sonundaki klorür geçirimsizlikleri ise her iki dozaj için de %5 ve %10 oranında ikame için düşük derecede geçirimsizlik sınıfında, %15 silis dumanı ikameliler ise çok düşük derece de geçirimsizlik sınıfında yer almışlardır.
3. Basınçlı su işleme derinliği itibariyle betonlarda mineral katkı ikamesi oranı arttıkça genel olarak MSİD değerlerinde düşme görülmesine rağmen bu azalma çok belirgin değildir. Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan şahit betonlar dışında tüm betonların ilgili standart kapsamında zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfında yer aldıkları görülmektedir.

4. Kılcal geçirimsizlik itibariyle uçucu kül ikameli betonlarda ikame oranının artmasıyla toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan betonlar için genel bir azalma ya da artıştan söz etmek olası değilken toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonlarda belirgin bir azalma söz konusudur. Silis dumanı ikameli betonlarda silis dumanı ikame oranının artmasıyla kılcallık katsayılarında azalma vardır. Silis dumanı ikameli betonlarda kılcallık katsayısının azalması uçucu kül ikame edilenlere göre oldukça yüksektir. Örneğin, toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonlar için %30 uçucu kül ikameli betonlarda şahit betona göre kılcallık katsayısındaki azalma %32 iken yalnızca %5 oranında silis dumanı ikameli betonlarda bile bu azalma %61 civarındadır. Silis dumanı kullanımı her iki dozaj için kılcallık katsayısının azalması bakımından da az miktarda çimento ikamesiyle bile uçucu kül kullanılan betonlardan oldukça iyi sonuçlar vermiştir.
5. Uçucu kül ikame oranı arttıkça betonların basınç dayanımları düşmektedir. Uçucu kül ikamesi betonların basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz etki toplam bağlayıcı miktarı fazla olan betonlarda daha az, toplam bağlayıcı miktarı az olan betonlarda daha fazladır. Silis dumanı ikame edilerek üretilen betonlarda her iki dozaj için de ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarında belirgin bir artış söz konusudur. Her iki mineral katkı ikamesi için de geçerli olmak üzere bu artış ve azalışlar çok belirgin olmasa da dikkate alınmalıdır.
6. Toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan şahit betonların hızlı klorür geçirimsizliği ve kılcal su emme itibariyle toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 şahit betonlara göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Sadece basınçlı su işleme derinliği itibariyle bu eğilim farklı çıkmıştır. Buradan yüksek dozaja sahip betonların geçirimsizlik özelliklerinin her zaman iyi olur düşüncesinin her zaman geçerli olmadığı görülmektedir. Ancak mineral katkı maddesi ikame oranı arttıkça toplam bağlayıcı miktarı 340 kg/m^3 olan betonların toplam bağlayıcı miktarı 290 kg/m^3 olan betonlara göre bahsedilen özelliklerin iyileştiğini söylemek mümkündür.
7. Sonuç itibariyle gerek uçucu kül gerekse silis dumanı ikameli betonların dayanıklılık özelliklerinin önemli oranda iyileştiğini söylemek olasıdır. Silis dumanı ikamesinin ayrıca beton basınç dayanımını da olumlu etkilediğini belirtmek gerekir. Bu olumlu etki az miktarda silis dumanı ikamesi durumunda dahi görülebilir.

8. Araştırmada su/çimento oranı 0.5 ve hedef çökme 6 cm alınmıştır. Araştırma farklı su/çimento oranları ve 10-15 cm çökmeli betonlar üzerinde tekrarı önerilebilir.
9. Araştırmada kullanılan en yüksek uçucu kül ikame oranı %30 olmuştur. Araştırma daha yüksek oranlarda uçucu kül ikamesi denenerak tekrarlanabilir. Silis dumanı için %0 ile %5 arasında ikame oranları incelemeye değer bulunabilir. Ayrıca her iki mineral katkı birlikte ve değişik oranlarda (çimento+uçucu kül+silis dumanı şeklinde) kullanılarak betonlar üretilebilir ve benzer deneysel çalışmalar yürütülebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Berndt, M. L., Properties of Sustainable Concrete Containing Fly Ash, Slag and Recycled Concrete Aggregate, Construction and Building Materials, 23 (2009) 2606-2613.
2. Asım, M. E., Blast Furnace Slag Processing to Blended Cements, ZKG – Zem Kalk Gips, 45 (1992) 519-526.
3. Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyum ve Sergisi, Nisan 2007, Ankara, Bildiriler Kitabı: 263-275.
4. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB), İstanbul, 2010.
5. Woods, H., Durability of Concrete Construction, ACI Monograph No:4, Detroit Michigan, 1968.
6. Neville, A., Chloride Attack of Reinforced Concrete: An Overview, Materials and Structures, 28 (1995) 63-70.
7. Akman, M. S., Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1992.
8. Neville, A. M., Properties of Concrete, Fourth Edition, John Wiley & Sons. Inc., New York, 1996.
9. Binici, H., Çağatay, İ. ve Kaplan, H., Değişik Faktörlerin Beton Mukavemetine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (2000) 200-209.
10. Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, Y., M., Topal, A. ve Öztürk, A. U., Beton, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2012.
11. Ramezani pour, A. A., Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume, Cement & Concrete Composites, 17 (1995) 125-133.
12. Chan, S. Y. N., Luo, X. and Sun, W., Effect of High Temperature and Cooling Regimes on the Compressive Strength and Pore Properties of High Performance Concrete, Construction and Building Materials, 14,5 (2000) 261-266.
13. Haque, M. N. and Kayyali, O. A., Strength and Porosity of Hardened Cement-Fly Ash Pastes in Hot Environment, ACI Materials Journal, 86,2 (1989) 128-134.

14. Türkmen, İ., Influence of Different Curing Conditions on the Physical and Mechanical Properties of Concretes with Admixtures of Silica Fume and Blast Furnace Slag, Materials Letters, 57 (2003) 4560-4569.
15. ACI Committee, Aggregates for Concrete, Edition Number: 1, Farmington Hills, 2007.
16. TS 706 EN 12620+A1, Beton Agregaları, T. S. E., Ankara, Nisan 2009.
17. Illston, J. M. and Domone, P. L. J., Construction Materials: Their Nature and Behaviour, Third Edition, Spon Press, London, 2001.
18. Güner, M. S. ve Süme, V., Yapı Malzemesi ve Beton, Üçüncü Baskı, Aktif Yayınevi, İstanbul, 2001.
19. Mills, A. P., Hayward, H. W. and Rader, L. F., Materials of Construction, John Wiley and Sons, New York, 1955.
20. TS EN 197-1, Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, T. S. E., Ankara, 2002.
21. TS EN 1008, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, T. S. E., Ankara, Nisan 2003.
22. Erdoğan, T.Y., Beton, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası, Ankara, 2003.
23. Topçu, İ. B., Demir, A. ve Boğa, A. R., Akışkanlaştırıcı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Taze Beton Özelliklerine Etkisi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 434 (2004) 38-40.
24. TS EN 934-2, Kimyasal Katkılar-Beton Harç ve Şerbeti İçin-Bölüm 2: Beton Katkıları, T. S. E., Ankara, 2002.
25. ASTM C 494-99a, Standart Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
26. Akman, M. S., Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması, 4. Ulusal Beton Kongresi, Ekim 1996, İstanbul, Bildiriler Kitabı I: 1-11.
27. ASTM C 618, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, 1991.
28. Vu, D. D., Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete, Delft University Press, Netherlands, 2002.

29. Erdoğan, Ş., Arslantürk, C. and Kurbetci, Ş, Influence of Fly Ash and Silica Fume on the Consistency Retention and Compressive Strength of Concrete Subjected to Prolonged Agitating, Construction and Building Materials, 25 (2011) 1277-1281.
30. Yavuz, H., Su Geçirimsiz Beton Tasarımı ve Örnek Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
31. Mehta, P. K., Pozzolanic and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review, The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by-Products in Concrete, ACI Special Publication SP-79, 1983, Detroit, 1-46.
32. Massaza, F., Pozzolans and Durability of Concrete, I. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, Turkish Cement Manufactures Association, 1997, İstanbul, 1-22.
33. Erdoğan, T. Y., Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, 1. Baskı, THBB, İstanbul, 2004.
34. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara, 2009.
35. Tokyay, M., Erdoğan, K., Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara, 1998.
36. Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 14,2 (2001) 11-23.
37. Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., Microstructural Analysis of Concrete with Silica Fume, 9th International Conference on Comp. Engineering, 2002, San Diego, 793-794.
38. Saran, A. G., Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ. T. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
39. Yeğınobalı, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB, Ankara, 2009.
40. ACI Committee 233, Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete, Edition Number:1, 1995.
41. Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., Concrete Microstructure Properties and Materials, Mc Graw Hill, 2006.
42. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özbay, E., Properties of Self Compacting Concretes Made with Binary, Ternary and Quaternary Cementitious Blends of Fly Ash, Blast Furnace Slag and Silica Fume, Construction and Building Materials, 23 (2009) 1847-1854.

43. Kandasamy, S., Shehata, M. H., Durability of Ternary Blends Containing High Calcium Fly Ash and Slag Against Sodium Sulphate Attack, Construction and Building Materials, 53 (2014) 267-272.
44. Ahmed, M. S., Kayali, O., Anderson, W., Chloride Penetration in Binary and Ternary Blended Cement Concretes as Measured by Two Different Rapid Methods, Cement & Concrete Composites, 30 (2008) 576-582.
45. Uluöz, N., Özbebek, H., Arslan, M., Açık, H., Farklı Çimento Tipleri ve Mineral Katkılar İle Üretilen Betonların Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri, Beton 2011 Hazır Beton Kongresi, Ekim 2011, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 376-387.
46. Durmuş, G., Farklı Beton Sınıflarının Su İşleme Derinliğinin Değerlendirilmesi, Politeknik Dergisi, 11,4 (2008) 379-383.
47. Türkel, S., Tarım, E. E., Deniz Suyunun Farklı Tip Çimentolarla Yapılan Harçlara Etkisi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13,3 (2011) 1-11.
48. Dhir, R. K., Jones, M. R., Development of Chloride-Resisting Concrete Using Fly Ash, Fuel, 78 (1999) 137-142.
49. Chalee, W., Ausapanit, P., Jaturapitakkul, C., Utilization of Fly Ash Concrete in Marine Environment for Long Term Design Life Analysis, Materials & Design, 31 (2010) 1242-1249.
50. Chindaprasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, H. T., Sirivivatnanon, V., Influence of Fly Ash Fineness on the Chloride Penetration of Concrete, Construction and Building Materials, 21 (2007) 356-361.
51. Boğa, A. R., Topçu, İ. B., Influence of Fly Ash on Corrosion Resistance and Chloride Ion Permeability of Concrete, Construction and Building Materials, 31 (2012) 258-264.
52. Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., Long-Term Chloride Diffusion in Silica Fume Concrete in Harsh Marine Concretes, Cement & Concrete Composites, 31 (2009) 769-775.
53. Elahi, A., Basheer, P. A. M., Nanukuttan, S. V., Khan, Q. U. Z., Mechanical and Durability Properties of High Performance Concretes Containing Supplementary Cementitious Materials, Construction and Building Materials, 24 (2010) 292-299.
54. Dinakar, P., Reddy, M. K., Sharma, M., Behaviour of Self Compacting Concrete Using Portland Pozzolana Cement with Different Levels of Fly Ash, Materials & Design, 46 (2013) 609-616.

55. Song, W., Saraswathy, V., Studies on the Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag-An Overwiev, J. Hazard Matter, 138 (2006) 226-233.
56. Val, D. V., Stewart, M. G., Life-Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments, Structural Safety, 25 (2003) 343-362.
57. Chia, K. S., Zhang, M., Water Permeability and Chloride Penetrability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete, Cement and Concrete Research, 32 (2002) 639-645.
58. Pavlik, V., Corrosion of Hardened Cement Paste by Acetic and Nitric Acids Part III: Influence of Water/Cement Ratio, Cement and Concrete Research, 26,3 (1996) 475-490.
59. Delagrave, A., Pigeon, M., Marchand, J., Revertegat, E., Influence of Chloride Ions and pH Levels on the Durability of High Performance Cement Pastes (Part II), Cement and Concrete Research, 26,5 (1996) 749-760.
60. Türkmen, İ, Gül, R., Çelik, C., Demirboğa, R., Determination by the Taguchi Method of Optimum Conditions for Mechanical Properties of High Strength Concrete with Admixtures of Silica Fume and Blast Furnace Slag, Civil Engineering and Enviromental Systems, 20,2 (2003) 105-118.
61. Long, A. E., Henderson, G. D., Montgomery, G. M., Why assess the Properties of Near-Surface Concrete?, Construction and Building Materials, 15 (2001) 65-79.
62. Bentz, D. P., Jensen, O. M., Coats, A. M., Glasser, F. P., Influence of Silica Fume on Diffusivity in Cement-Based Materials I. Experimental and Computer Modeling Studies on Cement Pastes, Construction and Building Materials, 30 (2000) 953-962.
63. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., Chutubtim, S., A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Finesses from Various Sources as Pozzolanic Materials, Cement & Concrete Composites, 23 (2001) 335-343.
64. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Sata, V., Leekeeratikul, T., Use of Ground Coarse Fly Ash as a Replacement of Condensed Silica Fume in Producing High-Strength Concrete, Cement and Concrete Research, 34 (2004) 549-555.
65. Erdoğan, Ş., Yapı Malzemelerinin Bozulması Ders Notları, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
66. ASTM C 1585, Standart Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, Philadelphia, 2013.
67. Onaran, K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 2000.

68. http://www.concrete.org.uk/fingertips_nuggets.asp?cmd=display&id=990 Depth of Water Penetration Under Pressure, 31.10.2014.
69. TS EN 12390-8, Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini, T. S. E., Ankara, Nisan 2010.
70. Klinkhoffer, O., Frolund, T., Poulsen, E., Rebar Corrosion Rate Measurements for Service Life Estimates, ACI Fall Convention Committee 365 “Practical Application of Service Life Models”, 2000, Toronto.
71. Yiğiter, H., Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, D.E.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008.
72. Doğan, Ü. A., Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsizlik Özellikleri ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
73. <http://www.renovanews.com/dosyadetay.asp?id=27> Korozyon ve Binalar, 30 Ekim 2014.
74. Raupach, M., Chloride Induced Macrocell Corrosion of Steel in Concrete – Theoretical Background and Practical Consequences, Construction and Building Materials, 10,5 (1996) 329-338.
75. Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R., Corrosion of steel in concrete- Prevention, Diagnosis, Repair, Weinheim, Cambridge, 2004.
76. Bioubakhsh, S., The Penetration of Chloride in Concrete Subject to Wetting and Drying: Measurement and Modelling, Doctoral Thesis, UCL (University College London), London, 2011.
77. Thomas, M. D. A., Pantazopoulou, S. J., and Martin-Perez, B., Service Life Modelling of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides-A Literature Review, Prepared for the Ministry of Transportation, Ontario, 1995.
78. Stanish, K. D., Hooton, R. D. and Thomas M. D. A., Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review, University of Toronto – Department of Civil Engineering, Ontario, 1997.
79. ASTM C 1202 – 12, Standart Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, Philadelphia, 2012.
80. TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, T. S. E., Ankara, Mart 2009.

7. EKLER

Ek 1. Üretilen betonlara ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

Ek Tablo 1. B290Ş kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

B290Ş	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.246	0.153
30	0.258	0.162
60	0.266	0.170
90	0.272	0.184
120	0.278	0.196
150	0.280	0.204
180	0.280	0.216
210	0.280	0.214
240	0.294	0.228
270	0.284	0.222
300	0.284	0.230
330	0.280	0.230
360	0.280	0.230

Ek Tablo 2. B290UK10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

B290UK10	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.231	0.116
30	0.248	0.118
60	0.275	0.124
90	0.285	0.132
120	0.292	0.136
150	0.300	0.140
180	0.304	0.144
210	0.306	0.150
240	0.304	0.156
270	0.316	0.164
300	0.302	0.172
330	0.298	0.172
360	0.303	0.170

Ek Tablo 3. B290UK20 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

B290UK20	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.181	0.078
30	0.194	0.080
60	0.214	0.078
90	0.230	0.082
120	0.250	0.084
150	0.250	0.084
180	0.246	0.088
210	0.246	0.088
240	0.244	0.088
270	0.250	0.090
300	0.238	0.092
330	0.228	0.092
360	0.224	0.091

Ek Tablo 4. B290UK30 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

B290UK30	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.153	0.051
30	0.174	0.054
60	0.184	0.054
90	0.200	0.054
120	0.208	0.056
150	0.220	0.056
180	0.234	0.058
210	0.244	0.060
240	0.244	0.060
270	0.250	0.064
300	0.250	0.064
330	0.248	0.066
360	0.260	0.068

Ek Tablo 5. B290SD5 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

B290SD5	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.096	0.061
30	0.098	0.062
60	0.098	0.064
90	0.102	0.066
120	0.106	0.068
150	0.108	0.068
180	0.114	0.072
210	0.114	0.076
240	0.116	0.076
270	0.120	0.080
300	0.120	0.082
330	0.124	0.082
360	0.126	0.087

Ek Tablo 6. B290SD10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirirliği akım okumaları

B290SD10	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.061	0.040
30	0.063	0.040
60	0.063	0.042
90	0.064	0.044
120	0.067	0.046
150	0.067	0.046
180	0.068	0.046
210	0.070	0.048
240	0.072	0.048
270	0.072	0.050
300	0.072	0.050
330	0.074	0.052
360	0.076	0.052

Ek Tablo 7. B290SD15 kodlu betona ait hızlı klorür geçirirliği akım okumaları

B290SD15	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.040	0.028
30	0.038	0.024
60	0.038	0.026
90	0.038	0.026
120	0.038	0.026
150	0.038	0.026
180	0.038	0.024
210	0.040	0.024
240	0.040	0.026
270	0.040	0.026
300	0.040	0.024
330	0.040	0.026
360	0.042	0.028

Ek Tablo 8. B340Ş kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

B340Ş	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.301	0.170
30	0.302	0.172
60	0.324	0.184
90	0.342	0.197
120	0.350	0.213
150	0.378	0.220
180	0.384	0.236
210	0.400	0.236
240	0.393	0.246
270	0.401	0.254
300	0.402	0.256
330	0.412	0.264
360	0.410	0.272

Ek Tablo 9. B340UK10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

B340UK10	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.260	0.136
30	0.268	0.142
60	0.280	0.146
90	0.288	0.152
120	0.304	0.162
150	0.310	0.162
180	0.308	0.172
210	0.316	0.178
240	0.320	0.184
270	0.324	0.196
300	0.324	0.198
330	0.334	0.204
360	0.320	0.202

Ek Tablo 10. B340UK20 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

B340UK20	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.213	0.081
30	0.230	0.086
60	0.248	0.084
90	0.268	0.086
120	0.290	0.086
150	0.300	0.090
180	0.316	0.092
210	0.318	0.092
240	0.324	0.092
270	0.328	0.096
300	0.322	0.100
330	0.326	0.098
360	0.330	0.100

Ek Tablo 11. B340UK30 kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

B340UK30	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.120	0.046
30	0.124	0.048
60	0.128	0.048
90	0.138	0.050
120	0.142	0.052
150	0.148	0.052
180	0.150	0.054
210	0.160	0.056
240	0.158	0.056
270	0.160	0.058
300	0.166	0.058
330	0.168	0.058
360	0.172	0.060

Ek Tablo 12. B340SD5 kodlu betona ait hızlı klorür geçirirliği akım okumaları

B340SD5	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.101	0.071
30	0.102	0.072
60	0.102	0.072
90	0.106	0.072
120	0.108	0.076
150	0.112	0.076
180	0.116	0.080
210	0.122	0.080
240	0.124	0.084
270	0.126	0.084
300	0.126	0.086
330	0.124	0.086
360	0.123	0.086

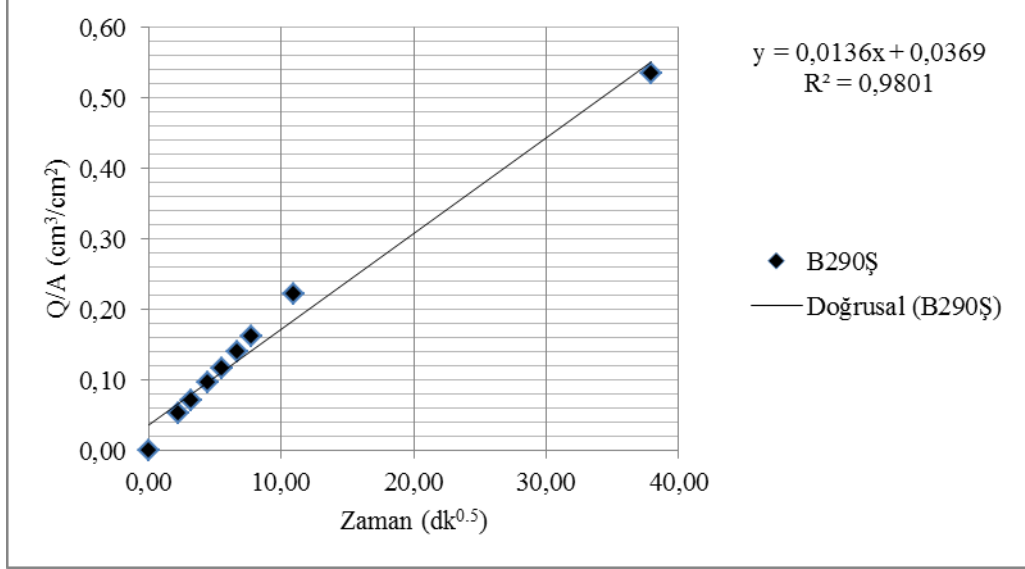
Ek Tablo 13. B340SD10 kodlu betona ait hızlı klorür geçirirliği akım okumaları

B340SD10	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.063	0.046
30	0.062	0.046
60	0.060	0.044
90	0.060	0.046
120	0.060	0.046
150	0.060	0.046
180	0.062	0.046
210	0.060	0.048
240	0.062	0.048
270	0.060	0.048
300	0.062	0.050
330	0.060	0.050
360	0.061	0.052

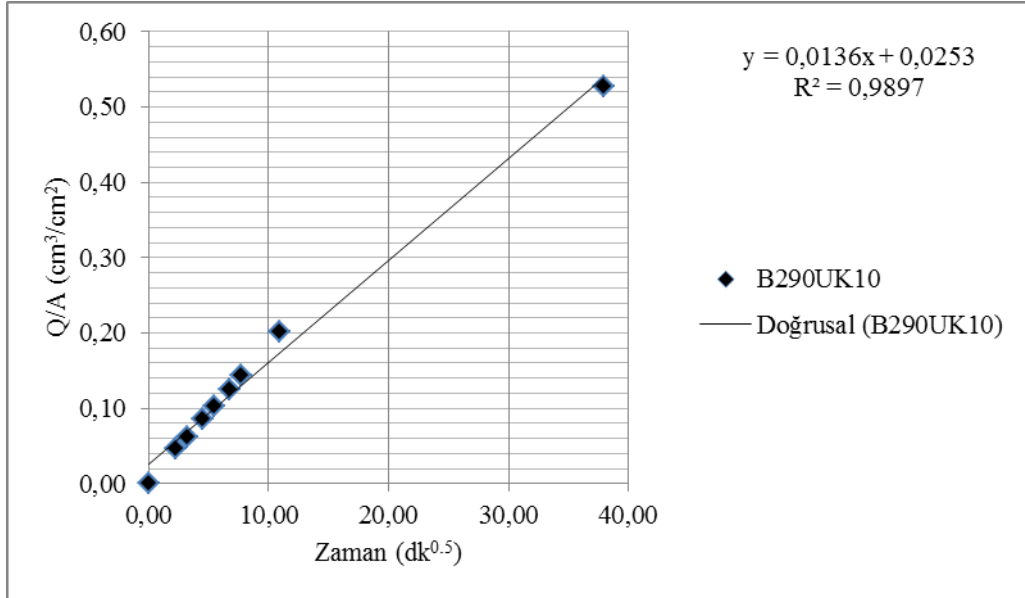
Ek Tablo 14. B340SD15 kodlu betona ait hızlı klorür geçirirliği akım okumaları

B340SD15	Uygulanan Kür Süresi	
	28 Gün	90 Gün
t (dk)	Geçen Akım (A)	Geçen Akım (A)
0	0.046	0.030
30	0.046	0.030
60	0.044	0.030
90	0.042	0.030
120	0.042	0.030
150	0.044	0.030
180	0.044	0.030
210	0.044	0.030
240	0.042	0.032
270	0.044	0.032
300	0.042	0.032
330	0.044	0.032
360	0.044	0.032

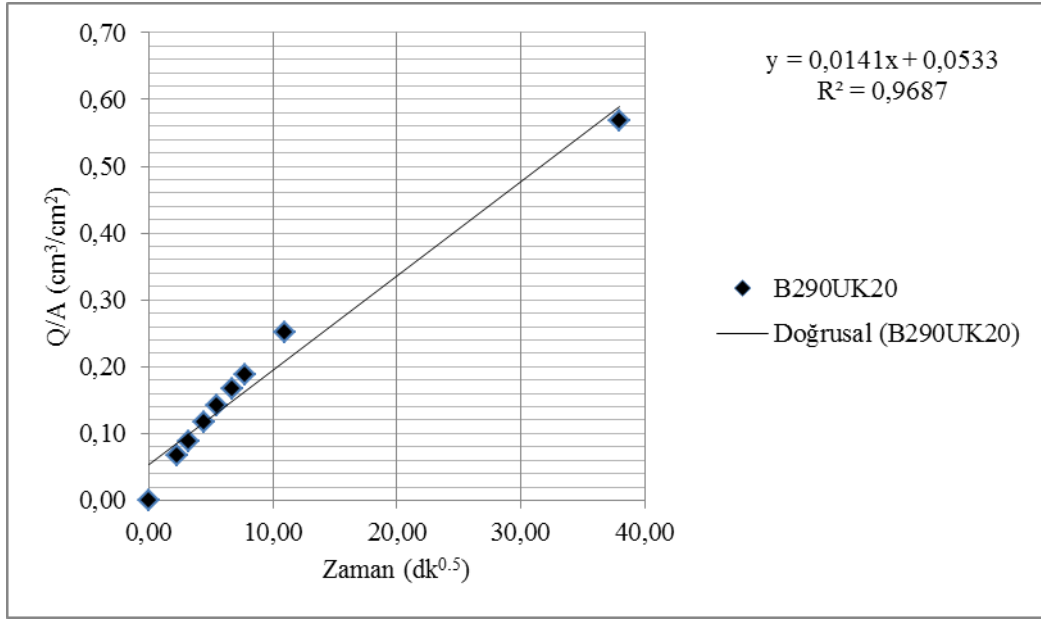
Ek 2. Üretilen betonların kılcallık katsayılarının hesaplanması ((Q/A) – (t^{0.5}) grafikleri)



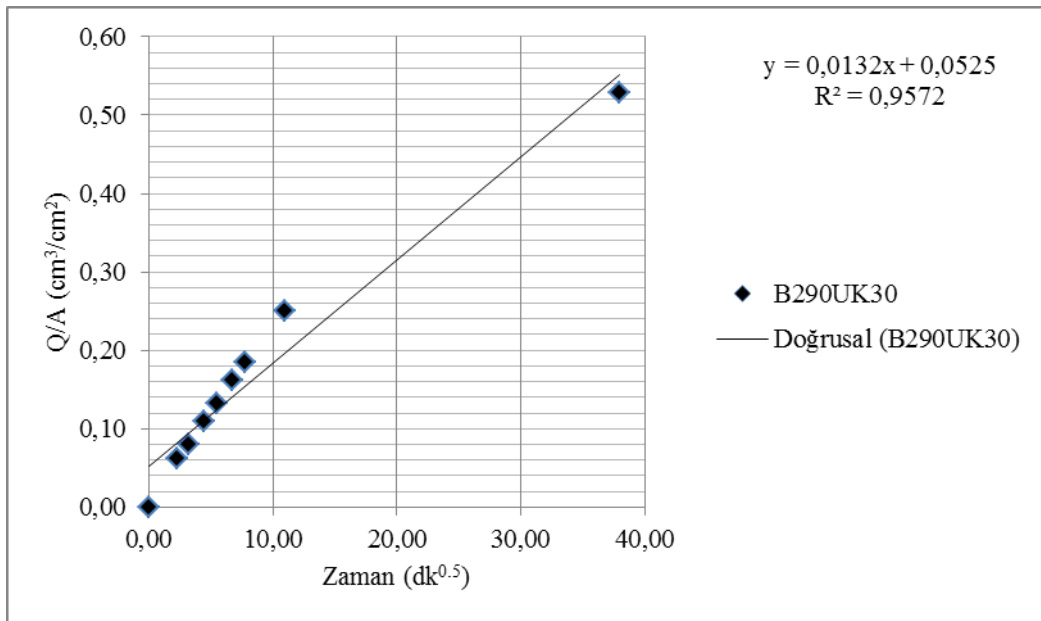
Ek Şekil 1. B290Ş kodlu betonun (Q/A) – (t^{0.5}) grafiği



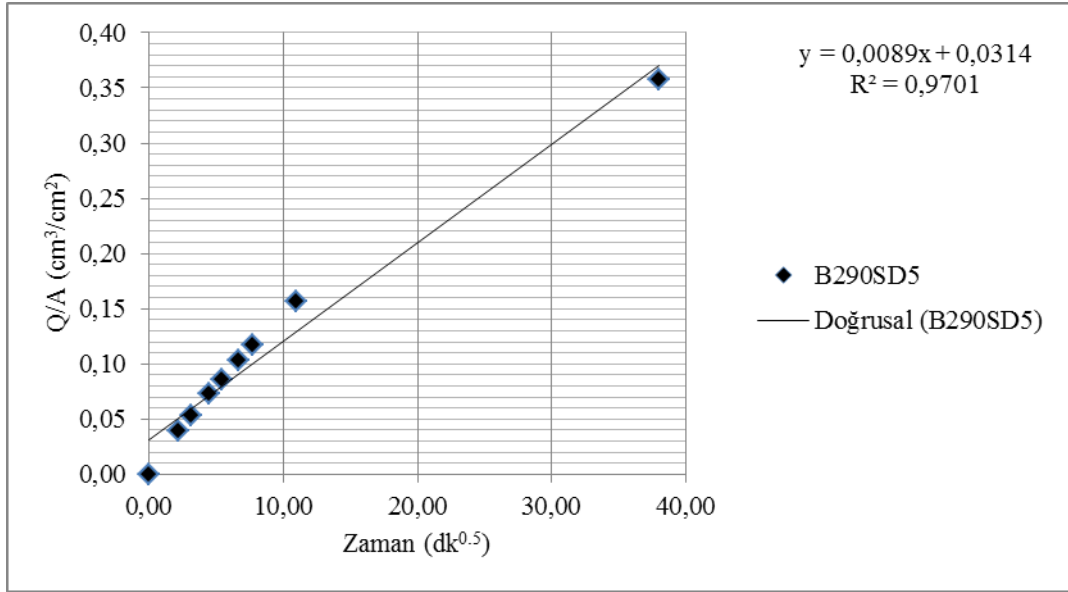
Ek Şekil 2. B290UK10 kodlu betonun (Q/A) – (t^{0.5}) grafiği



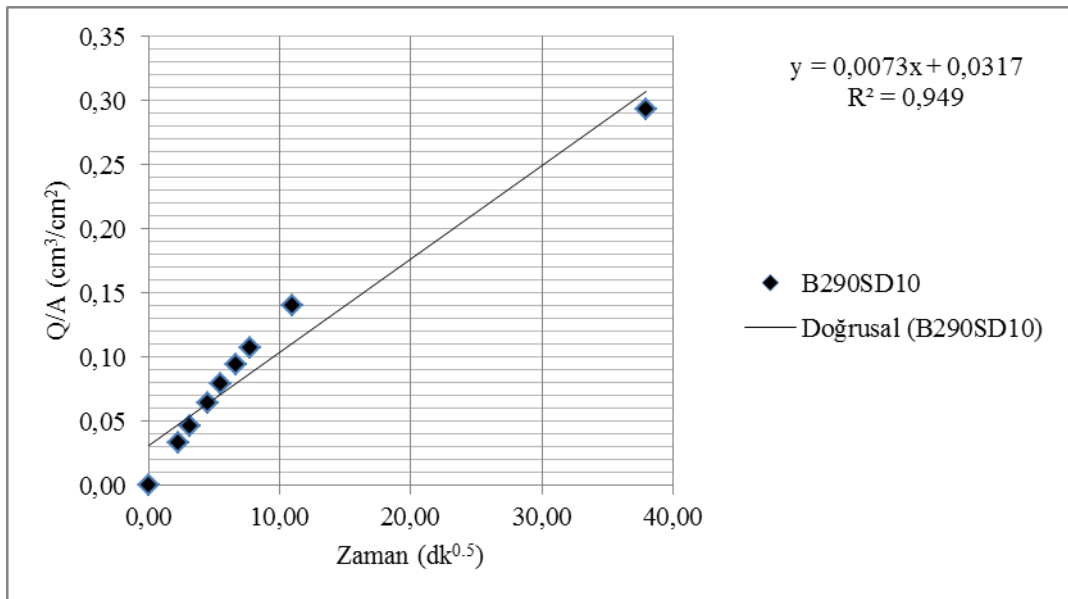
Ek Şekil 3. B290UK20 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



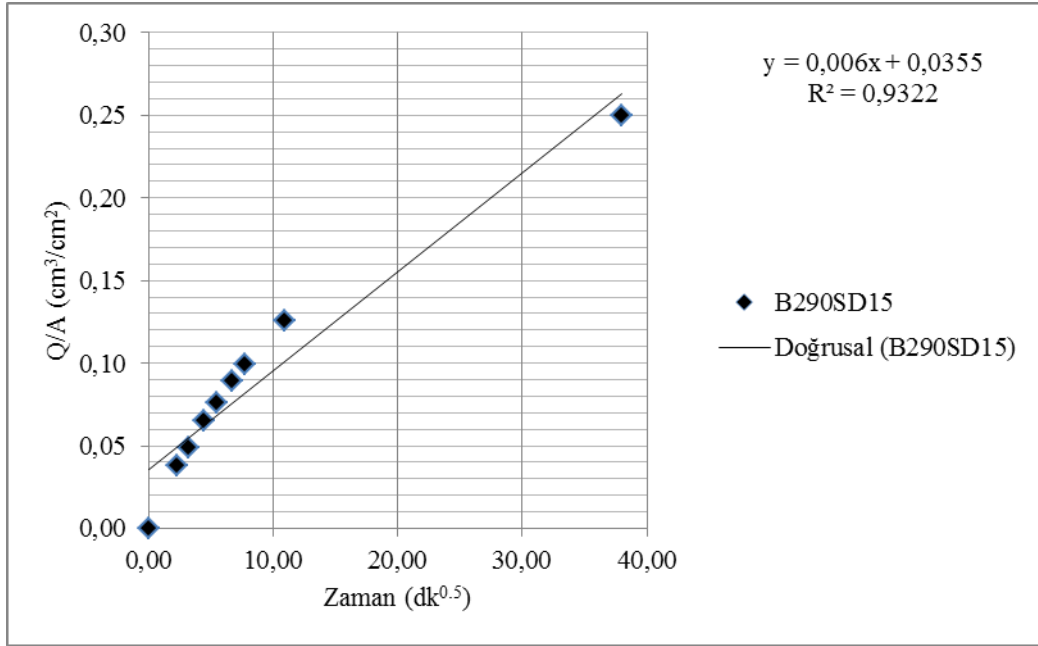
Ek Şekil 4. B290UK30 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



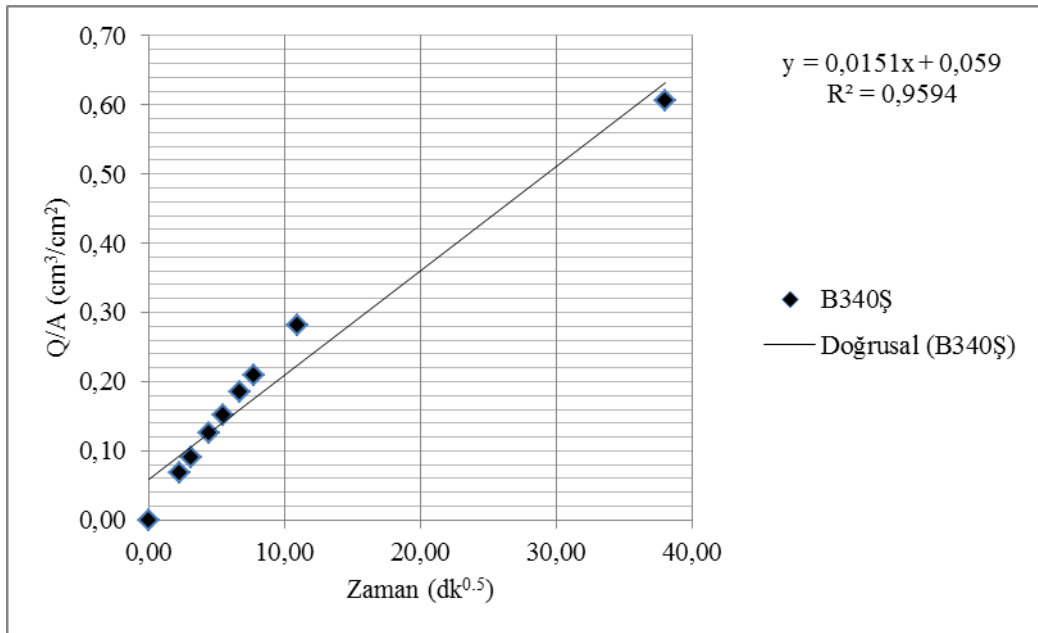
Ek Şekil 5. B290SD5 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



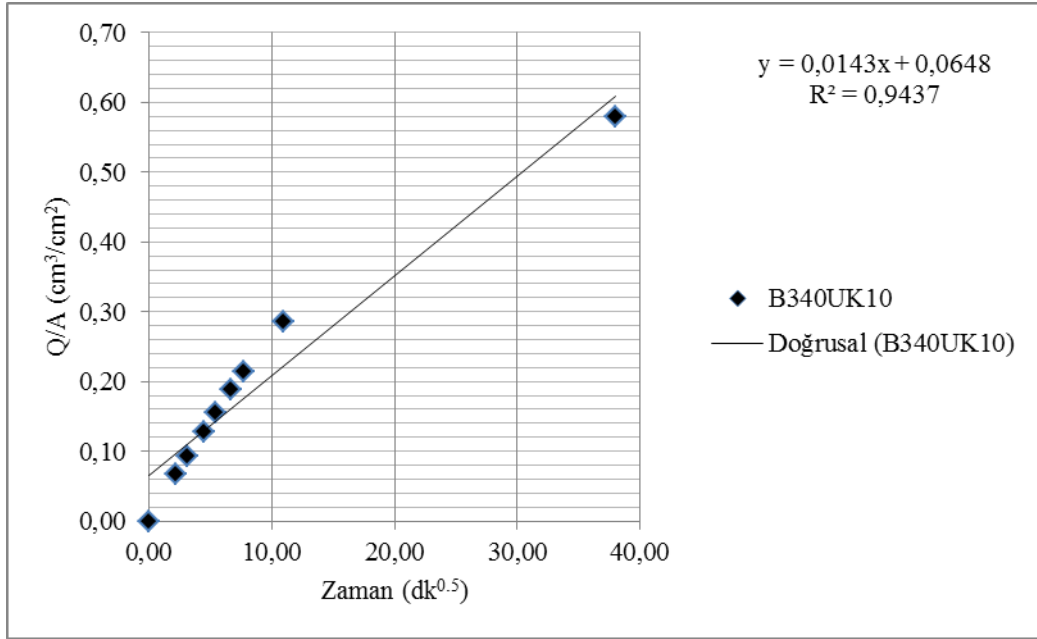
Ek Şekil 6. B290SD10 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



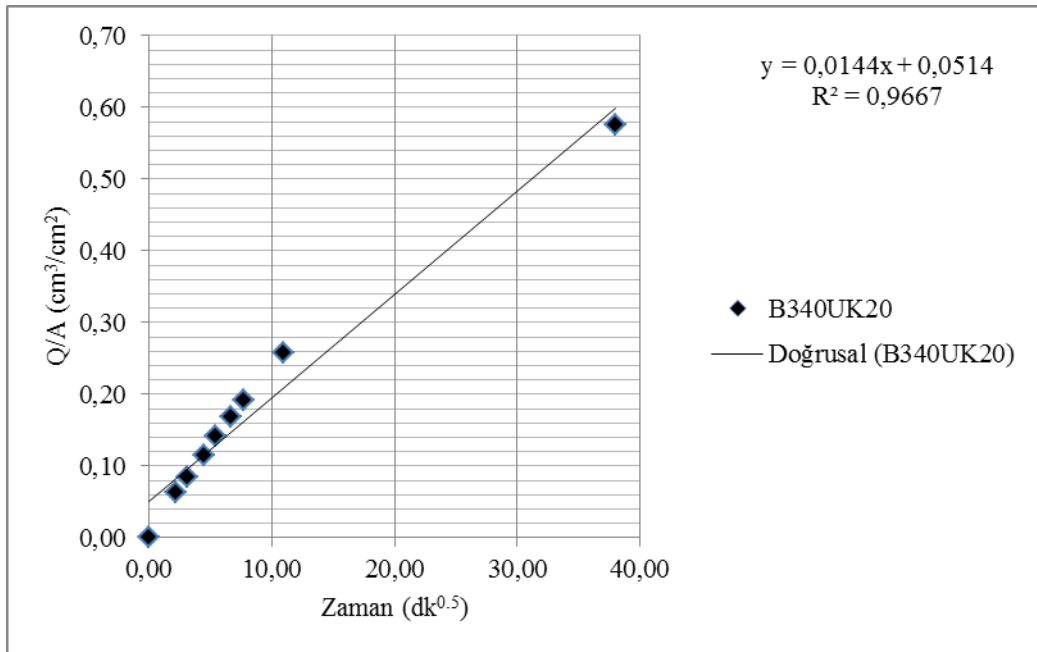
Ek Şekil 7. B290SD15 kodlu betonun (Q/A) – ($t^{0.5}$) grafiği



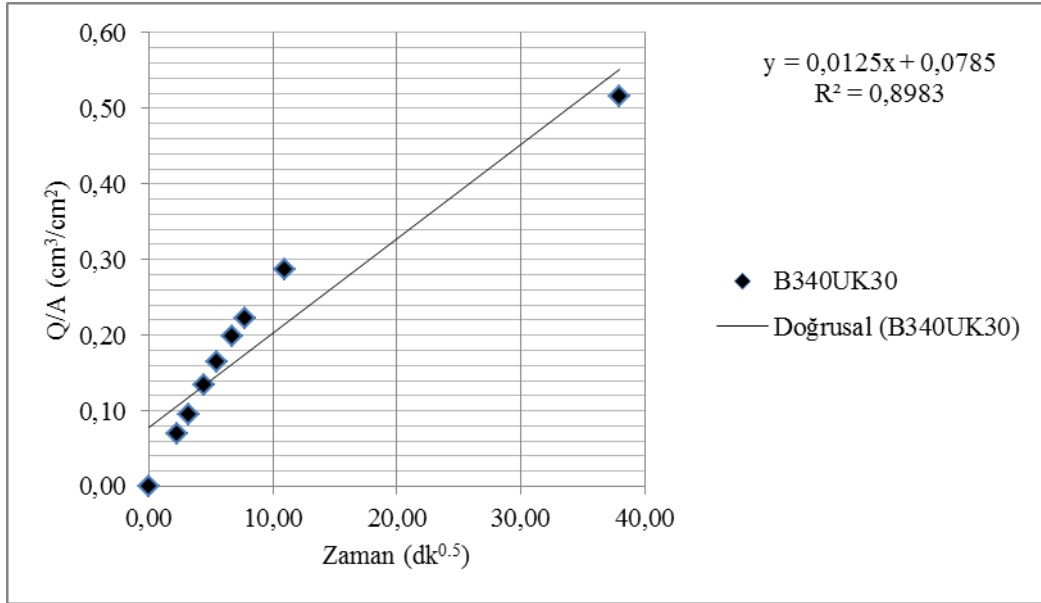
Ek Şekil 8. B340Ş kodlu betonun (Q/A) – ($t^{0.5}$) grafiği



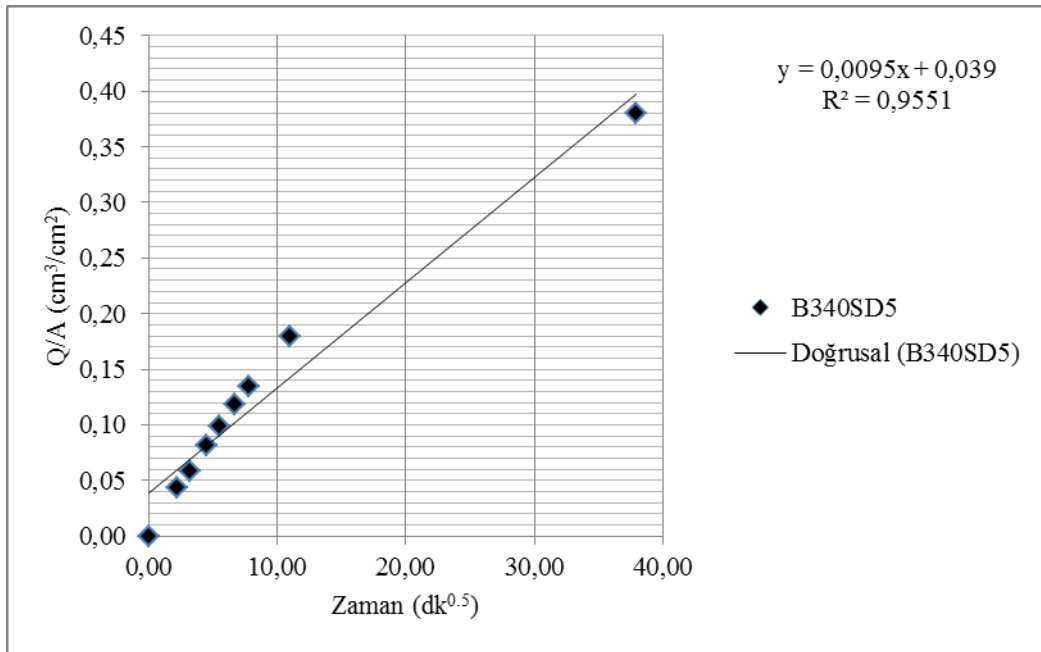
Ek Şekil 9. B340UK10 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



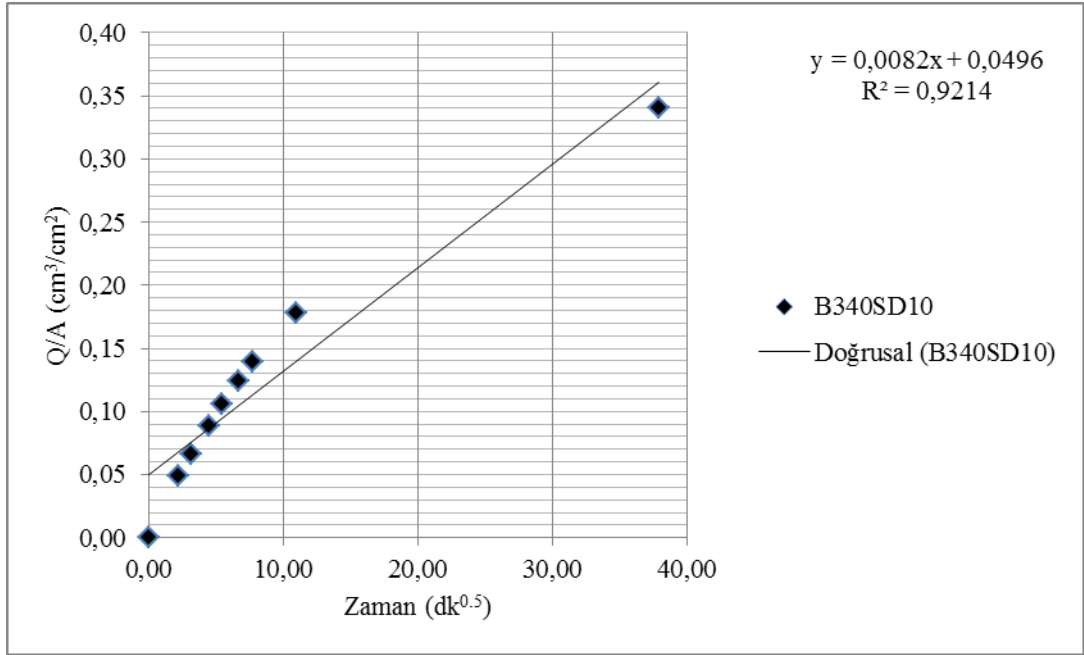
Ek Şekil 10. B340UK20 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



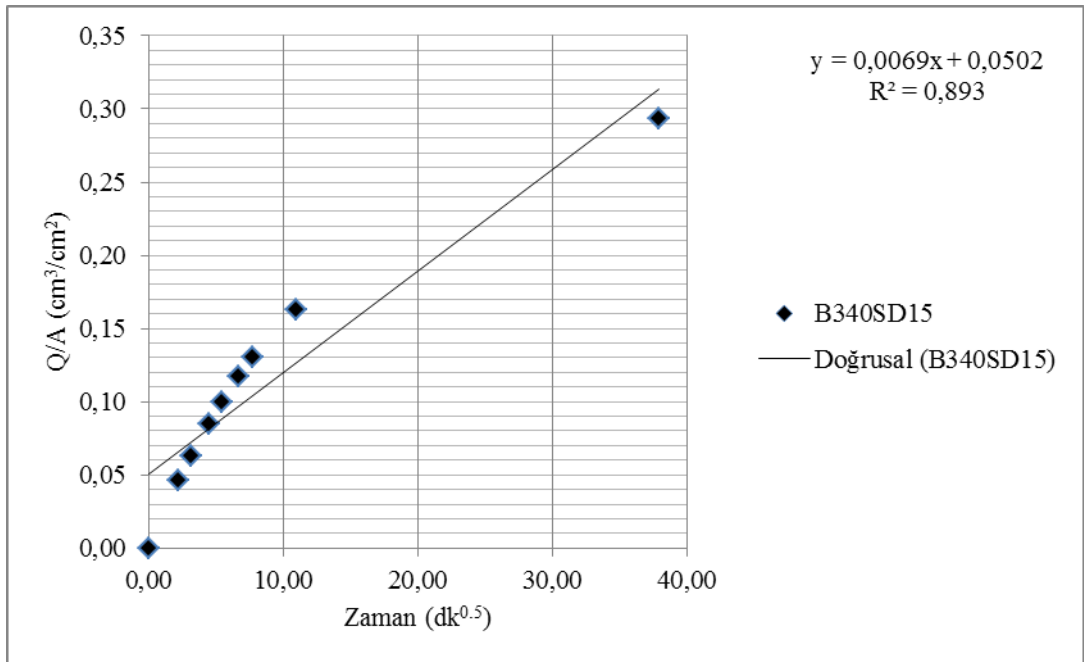
Ek Şekil 11. B340UK30 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



Ek Şekil 12. B340SD5 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



Ek Şekil 13. B340SD10 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



Ek Şekil 14. B340SD15 kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk KANDİL, 29.05.1986 yılında Erzincan'da doğdu. İlköğrenimini Ziya Gökalp İlköğretim okulunda, liseyi Erzincan Yabancı Dil Ağırlıklı Lisede tamamladı. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ni bitirdi. 2010 yılında çift anadal programı kapsamında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü tamamladı. 2010-2011 yıllarında ÖYP kapsamında İTÜ'de 6 ay yabancı dil eğitimi gördü. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (Yapı Malzemeleri) Bölümünde yüksek lisansa başladı. İngilizce bilmektedir.