

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN KARAKTERİZASYONU VE
DENEY KOŞULLARININ BETONUN DONMA-ÇÖZÜLME HASARINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Yuşa ŞAHİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN KARAKTERİZASYONU VE
DENEY KOŞULLARININ BETONUN DONMA-ÇÖZÜLME HASARINA ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Yuşa ŞAHİN
(501072020)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR

Eş Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA

TEMMUZ 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501072020 numaralı Doktora Öğrencisi **Yuşa ŞAHİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN KARAKTERİZASYONU VE DENEY KOŞULLARININ BETONUN DONMA-ÇÖZÜLME HASARINA ETKİSİ ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

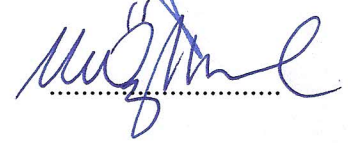
Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi



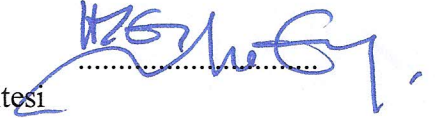
Eş Danışman : **Prof.Dr. Yılmaz AKKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. M. Hulusi ÖZKUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi



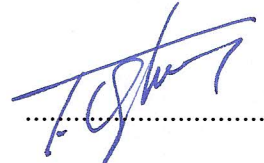
Prof. Dr. H. Yaşa ERSOY
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi



Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Turan ÖZTURAN
Boğaziçi Üniversitesi



Doç. Dr. N. Hakan ATAHAAN
İstanbul Teknik Üniversitesi



Teslim Tarihi : 20 Haziran 2013
Savunma Tarihi : 10 Temmuz 2013

ÖNSÖZ

Doktoram süresince bilgi birikimlerini ve yakın ilgilerini esirgemeyen danışman hocalarım Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e ve Prof. Dr. Yılmaz AKKAYA'ya çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sırasında yaptıkları öneriler dolayısıyla Prof. Dr. M. Hulusi ÖZKUL'a, Prof. Dr. H. Yaşa ERSOY'a, Prof. Dr. Nabi YÜZER'e, Prof. Dr. Turan ÖZTURAN'a ve Doç. Dr. N. Hakan ATAHAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarımın bazı bölümlerinde bilgi ve birikimlerinden faydalandığım Yapı Malzemesi dalındaki tüm hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma, İ.T.Ü. Maden Fakültesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Mehmet S. ÇELİK'e ve Doç. Dr. Feridun BOYLU'ya, İ.T.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünden Araş. Gör. Dr. Cüneyt ÜNLÜ'ye teşekkür ederim.

Yoğun deneysel çalışmalarım boyunca verdikleri destek dolayısıyla Yapı Malzemesi ve Marmaray Laboratuvarları teknik elemanları ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Lisans eğitimimde beni akademik hayata yönlendiren, yüksek lisans danışmanlığımı da yapmış olan, doktora süresince desteğini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Fuat KÖKSAL'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca gösterdiği sabır ve anlayış dolayısıyla sevgili eşim Sultan'a ve motivasyonumu arttıran canım kızım Kavin'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan fedakar anneme ve babama minnetlerimi sunarım.

Haziran 2013

Yuşa ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Beton İçindeki Boşluklar ve Boyutları.....	1
1.2 Boşlukların Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisi.....	2
1.3 Tezin Amacı	5
1.4 Tezin Planı.....	6
2. HAVA SÜRÜKLENMİŞ BETONLAR.....	9
2.1 Betonda Hava Boşluğu Oluşumu	9
2.2 Hava Boşluğu Sistemi	10
2.3 Hava Sürüklemenin Beton Özelliklerine Etkileri.....	11
2.4 Hava Sürüklemeyi Etkileyen Parametreler	11
2.4.1 Betonu oluşturan malzemelerin etkileri	11
2.4.2 Karışım kompozisyonu ve karakteristiğinin etkisi.....	14
2.4.3 Karıştırma, yerleştirme ve yüzey düzeltme işlemlerinin etkileri	15
3. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN KİMYASAL ESASLARININ HAVA BOŞLUĞU SİSTEMİ OLUŞUMUNA ETKİSİ.....	17
3.1 Giriş.....	17
3.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı	18
3.3 DeneySEL Çalışma	19
3.3.1 Kullanılan malzemeler	19
3.3.1.1 Çimento.....	19
3.3.1.2 AgregA	19
3.3.1.3 Hava sürükleyici katkılar	20
3.3.2 Harç karışımı tasarımları.....	20
3.3.3 DeneySEL yöntemler.....	22
3.3.3.1 Yüzey gerilimi ölçümleri	22
3.3.3.2 Köpük indeksi deneyi.....	24
3.3.3.3 Köpük drenajı deneyi	25
3.3.3.4 AVA ile hava boşluğu sistemi analizleri.....	26
3.3.3.5 Cam penetrasyonu deneyi	28
3.3.3.6 Basınç dayanımı deneyi	28
3.3.3.7 Civalı porozimetre deneyi	29
3.3.3.8 Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	29
3.3.4 Deney sonuçları.....	29
3.3.4.1 Yüzey gerilimi deneyi	29
3.3.4.2 Köpük indeksi deneyi.....	30

3.3.4.3 Köpük drenajı deneyi	31
3.3.4.4 Hava boşluğu sistemi analizleri.....	32
3.3.4.5 Cam penetrasyonu deneyi	33
3.3.4.6 Basınç dayanımı deneyi	34
3.3.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	34
3.3.5.1 Yüzey gerilimi katkı miktarı ilişkisi.....	34
3.3.5.2 Yüzey gerilimi hava boşluğu sistemi parametreleri ilişkisi	36
3.3.5.3 Katkı miktarı hava boşluğu sistemi parametreleri ilişkisi.....	38
3.3.5.4 Hava boşluğu boyut dağılımları	40
3.3.5.5 Cam penetrasyonu deneyi	44
3.3.5.6 Basınç dayanımı deneyi	44
3.3.5.7 Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	45
3.3.6 Sonuçlar.....	48
4. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BETON PERFORMANSININ	
BELİRLENMESİ VE HAVA BOŞLUĞU SİSTEMİ KARARLILIĞI.....	51
4.1 Giriş	51
4.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı	52
4.3 Deneysel Çalışma	52
4.3.1 Kullanılan malzemeler	53
4.3.1.1 Çimento ve uçucu kül	53
4.3.1.2 Agregası	54
4.3.1.3 Hava sürükleyici katkıları	54
4.3.1.4 Süperakışkanlaştırıcı katkıları	54
4.3.2 Beton karışımı tasarımları	54
4.3.2.1 Agregası karışım granülometrisi	55
4.3.2.2 Beton bileşimleri ve malzeme miktarları.....	55
4.3.2.3 Üretim ve taze beton deneyleri	57
4.3.3 Deneysel yöntemler.....	57
4.3.3.1 Beton reometresi ile reolojik parametrelerinin belirlenmesi	57
4.3.4 Deney sonuçları.....	59
4.3.4.1 Performans deneylerinin sonuçları	59
4.3.4.2 Taze beton deney sonuçları	61
4.3.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	65
4.3.5.1 Köpük indeksi.....	65
4.3.5.2 Yüzey gerilimi deneyi	67
4.3.5.3 Köpük drenajı deneyi.....	69
4.3.5.4 Taze beton deneyleri.....	71
4.3.6 İrdeleme ve değerlendirme.....	79
4.3.7 Sonuçlar.....	80
5. HAVA BOŞLUĞU SİSTEMİ PARAMETRELERİNİN BETONLARIN	
DONMA-ÇÖZÜLME DAYANIKLILIĞI, MEKANİK, İLETKENLİK VE	
GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ.....	83
5.1 Giriş	83
5.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı	84
5.3 Deneysel Çalışma	84
5.3.1 Kullanılan malzemeler	84
5.3.1.1 Çimento	84
5.3.1.2 Agregası	84
5.3.1.3 Hava sürükleyici katkıları	85
5.3.2 Beton karışımı tasarımları	85

5.3.2.1	Agrega karışım granülometrisi	86
5.3.2.2	Beton bileşimi ve malzeme miktarları.....	86
5.3.2.3	Üretim, taze beton deneyleri ve numune alma işlemleri	87
5.3.3	Deneyssel yöntemler.....	88
5.3.3.1	Hava miktarı ölçümleri	88
5.3.3.2	Hava boşluğu sistemi parametrelerinin belirlenmesi	89
5.3.3.3	CDF deneyi	91
5.3.3.4	Elektriksel iletkenlik ölçümleri	94
5.3.3.5	Geçirimsizlik deneyleri ölçümleri	95
5.3.4	Deney sonuçları.....	95
5.3.4.1	Taze beton deney sonuçları	95
5.3.4.2	Hava boşluğu sistemi parametreleri	96
5.3.4.3	Donma-çözülme deneyi sonuçları.....	96
5.3.4.4	Mekanik özelliklerle ilgili yapılan deneylerin sonuçları.....	97
5.3.4.5	İletkenlik özellikleri ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları	98
5.3.4.6	Geçirimsizlik özellikleri ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları	99
5.3.5	Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	99
5.3.5.1	Taze beton deneyleri	99
5.3.5.2	Hava boşluğu sistemi analizleri	101
5.3.5.3	Donma-çözülme deneyleri	104
5.3.5.4	Mekanik özellikler deneyleri.....	112
5.3.5.5	İletkenlik özellikleri deneyleri	113
5.3.5.6	Geçirimsizlik özellikleri deneyleri	116
5.3.6	Sonuçlar	118
6.	DENEY KOŞULLARININ DONMA-ÇÖZÜLME HASARINA ETKİSİ....	121
6.1	Giriş	121
6.2	Çalışmanın amacı ve kapsamı	122
6.3	Deneyssel Çalışma	123
6.3.1	Kullanılan malzemeler	123
6.3.1.1	Çimento	123
6.3.1.2	Agrega	123
6.3.1.3	Hava sürükleyici katkılar.....	123
6.3.2	Beton karışımı tasarımları	123
6.3.2.1	Agrega karışım granülometrisi	123
6.3.2.2	Beton bileşimi ve malzeme miktarları.....	123
6.3.2.3	Üretim, taze beton deneyleri ve numune alma işlemleri	124
6.3.3	Deneyssel yöntemler.....	124
6.3.3.1	CIF deneyi.....	124
6.3.3.2	Düzlem kesit analizleri.....	128
6.3.4	Uygulanan deney koşulları.....	128
6.3.5	Deney sonuçları.....	130
6.3.5.1	Taze beton deney sonuçları	130
6.3.5.2	Hava boşluğu sistemi analizleri	130
6.3.5.3	Donma-çözülme deneyi sonuçları.....	131
6.3.5.4	Betonlar üzerinde yapılan diğer deneylere ait sonuçlar	132
6.3.6	Deney sonuçlarının değerlendirilmesi	133
6.3.6.1	Hava boşluğu sistemi analizleri	133
6.3.6.2	Donma-çözülme deneyleri	135
6.3.6.3	Düzlem kesit incelemeleri.....	143
6.3.7	Sonuçlar	146

7. SONUÇLAR.....	149
KAYNAKLAR.....	155
EKLER.....	161
ÖZGEÇMİŞ	177

KISALTMALAR

AEA	: Air Entraining Admixture (Hava Sürükleyici Katkı)
AVA	: Air Void Analyzer (Taze beton hava boşluğu sistemi analizleri)
CDF	: Capillary suction Deicing salts and Freeze thaw test
CIF	: Capillary suction Internal damage and Freeze thaw test
D/Ç	: Donma-Çözülme
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
HBS	: Hava Boşluğu Sistemi
HSK	: Hava Sürükleyici Katkı
HDH	: Hızlı Donma Hızı
MF	: Modifiye Fosfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
MIP	: Mercury Intrusion Porosimetry (Civalı Porozimetre Deneyi)
PE	: Polikarboksilik Eter esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı
RA	: Rapid Air 457 (Sertleşmiş beton hava boşluğu sistemi analizleri)
SA	: Süperakışkanlaştırıcı katkı
SB	: Sertleşmiş Beton
S/Ç	: Su/çimento oranı
SDÇ	: Standart Donma Çevrimi
TB	: Taze Beton
UDS	: Uzun Donma Süresi
UK	: Uçucu Kül
YDH	: Yavaş Donma Hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Powers-Brownyard modeline göre hesaplanan poroziteler.....	2
Çizelge 1.2 : Su/çimento oranı ve hidrasyon derecesine bağlı kapiler poroziteler...	2
Çizelge 3.1 : Yaygın olarak kullanılan hava sürükleyici katkıların sınıflandırılması ve performans karakteristikleri.....	18
Çizelge 3.2 : Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.	19
Çizelge 3.3 : Agregalara ait fiziksel özellikler ve elek analizi sonuçları.....	20
Çizelge 3.4 : Hava sürükleyici katkıların kodları ve özellikleri.	20
Çizelge 3.5 : Harçlara ait karışım kodları ve malzeme miktarları.	21
Çizelge 3.6 : Yüzey gerilimi yönteminde su/çimento oranının belirlenmesi.	23
Çizelge 3.7 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.	30
Çizelge 3.8 : Köpük indeksi deney sonuçları.	30
Çizelge 3.9 : Köpük drenajı deney sonuçları.	31
Çizelge 3.10 : Köpük drenajı deneyi parametreleri.	31
Çizelge 3.11 : Harçların hava boşluğu sistemi analizleri.	32
Çizelge 3.12 : Cam penetrasyonu deneyi sonuçları.	33
Çizelge 3.13 : Basınç dayanımı deney sonuçları.	34
Çizelge 4.1 : Çimentoların ve uçucu külün kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.	53
Çizelge 4.2 : Agregalara ait fiziksel özellikler ve elek analizi sonuçları.....	54
Çizelge 4.3 : Süperakışkanlaştırıcı katkıların fiziksel özellikleri.....	54
Çizelge 4.4 : Beton bileşimleri ve malzeme miktarları (1. aşama).....	56
Çizelge 4.5 : Beton bileşimleri ve malzeme miktarları (2. aşama).....	56
Çizelge 4.6 : Beton bileşimleri ve malzeme miktarları (3. aşama).....	56
Çizelge 4.7 : Üretimde malzeme eklenme sırası ve karıştırma süreleri.	57
Çizelge 4.8 : Köpük indeksi deney sonuçları.	59
Çizelge 4.9 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.	60
Çizelge 4.10 : Köpük drenajı deneyi sonucu hesaplanan parametreler.	61
Çizelge 4.11 : Taze beton deney sonuçları (1. aşama).	62
Çizelge 4.12 : Taze beton deney sonuçları (2. aşama).	63
Çizelge 4.13 : Taze beton deney sonuçları (3. aşama).	64
Çizelge 5.1 : Farklı hava sürükleyici katkıların donma-çözülme performansları	83
Çizelge 5.2 : Elek analizi sonuçları.	85
Çizelge 5.3 : Agregalara ait fiziksel özellikler.	85
Çizelge 5.4 : Karışım kodları ve malzeme miktarları.	87
Çizelge 5.5 : Üretimde malzeme eklenme sırası ve karıştırma süreleri.	87
Çizelge 5.6 : Taze beton deneylerine ait sonuçlar.	95
Çizelge 5.7 : Hava boşluğu sistemi parametreleri.	96
Çizelge 5.8 : Donma-çözülme deneyi sonuçları.	97
Çizelge 5.9 : Mekanik özellikler deneyleri.	97
Çizelge 5.10 : Mekanik özellikler deney sonuçları.	98
Çizelge 5.11 : İletkenlik deneyleri sonuçları.	98

Çizelge 5.12 : Geçirimlilik deneyleri sonucunda hesaplanan değerler.....	99
Çizelge 6.1 : Karışım kodları.....	124
Çizelge 6.2 : Beton bileşimleri.....	124
Çizelge 6.3 : Standart D/Ç çevrimi ve farklı deney koşullarına ait bazı özellikler.....	129
Çizelge 6.4 : Taze beton deneylerine ait sonuçlar.....	130
Çizelge 6.5 : Hava boşluğu sistemi parametreleri.....	131
Çizelge 6.6 : Donma-çözülme deneyi sonuçları.....	131
Çizelge 6.7 : Mekanik özellikler deney sonuçları.....	132
Çizelge 6.8 : İletkenlik deneyleri sonuçları.....	132
Çizelge 6.9 : Geçirimlilik deneyleri sonuçları.....	133
Çizelge C.1 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 1).....	171
Çizelge C.2 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 2).....	171
Çizelge C.3 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 3).....	171
Çizelge C.4 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 4).....	172
Çizelge C.5 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 5).....	172
Çizelge C.6 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 6).....	172
Çizelge D.1 : Köpük drenajı deney sonuçları.....	173

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Beton içerisindeki boşluklar ve boyut dağılımları.	1
Şekil 1.2 : Kapiler boşluk çapı donma sıcaklığı ilişkisi.....	3
Şekil 1.3 : Tez planı.	7
Şekil 2.1 : Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı.	9
Şekil 2.2 : HSK moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları.	10
Şekil 2.3 : Hava boşluğu boyut dağılımı.	13
Şekil 2.4 : S/Ç oranı hava boşluğu çapı ilişkisi.	14
Şekil 3.1 : Yüzey gerilimi ölçümleri.....	22
Şekil 3.2 : S/Ç oranına bağlı olarak özgül iletkenlik ve pH değişimleri.	23
Şekil 3.3 : Köpük indeksi deneyi değerlendirmesi.	25
Şekil 3.4 : Köpük drenajı deneyi.	26
Şekil 3.5 : Taze betonda hava boşluğu sistemi ölçümleri.....	27
Şekil 3.6 : Cam penetrasyonu deney düzeneği.	28
Şekil 3.7 : Normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi.	35
Şekil 3.8 : Normalize yüzey geriliminin hava miktarı ile değişimi.	36
Şekil 3.9 : Normalize yüzey gerilimi ile aralık faktörü ilişkisi.	37
Şekil 3.10 : Normalize yüzey gerilimi ile özgül yüzey ilişkisi.....	37
Şekil 3.11 : Yüzey gerilimi ve katkı miktarına göre özgül yüzey değerleri.	38
Şekil 3.12 : Hava boşluğu sistemi parametrelerinin katkı miktarı ile değişimleri.....	39
Şekil 3.13 : Hava boşluğu boyut dağılımları.	41
Şekil 3.14 : Boşluk boyut dağılımları.	42
Şekil 3.15 : Kritik boşluk çapı ile hava miktarı ve S/Ç oranı ilişkisi.	43
Şekil 3.16 : Penetrasyon derinliğinin katkı miktarı ile değişimi.	44
Şekil 3.17 : Basınç dayanımının hava miktarı ile değişimi.	45
Şekil 3.18 : Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	46
Şekil 3.19 : Yüzey gerilimi ile boşluk sistemi ve katkı miktarı ilişkileri.	48
Şekil 4.1 : Deneysel çalışmanın şematik gösterimi.	53
Şekil 4.2 : Agreg a karışımına ait granülo metri eğrisi.....	55
Şekil 4.3 : Karışım kodları.....	55
Şekil 4.4 : Beton reometresi.....	57
Şekil 4.5 : Tipik tork gelişim eğrisi.	58
Şekil 4.6 : Tipik gerilme-kayma hızı grafiği.	58
Şekil 4.7 : Köpük indeksi deney sonuçları.	65
Şekil 4.8 : Katı madde miktarına göre köpük indeksi deney sonuçları.	66
Şekil 4.9 : Betonlar üzerinde kullanılan katkı miktarı ile köpük indeksi deneyinde yüzeyin kaplandığı durumdaki katkı miktarı arasındaki ilişki.....	67
Şekil 4.10 : Normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi.	68
Şekil 4.11 : Katı madde miktarına göre normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi.	68
Şekil 4.12 : Köpük drenajı deneyi sonucu hesaplanan V_0 değerleri.	69

Şekil 4.13 : Köpük drenajı deneyi sonucu hesaplanan-1/k değerleri.	70
Şekil 4.14 : Uçucu kül kullanımının hava sürüklenme üzerindeki etkisi.	71
Şekil 4.15 : Çökme ve çökmede-yayılma deneylerine ait fotoğraflar.	72
Şekil 4.16 : Betonların hava miktarının zamanla değişimi.	72
Şekil 4.17 : Hava miktarının plastik viskozite ve zamanla değişimi.	73
Şekil 4.18 : R tipi çimento ve modifiye fosfonat esaslı SA kullanılan betonlar.	74
Şekil 4.19 : R ve N tipi çimentolu betonların hava miktarları ve plastik viskozitelerinin zamanla değişimi.	75
Şekil 4.20 : Çökmenin statik ve dinamik akma gerilmeleri ile değişimi.	76
Şekil 4.21 : Plastik viskozite ve statik akma gerilmesi arasındaki ilişki.	76
Şekil 4.22 : Beton karışımlarına ait Bingham modeli parametreleri.	77
Şekil 4.23 : Statik akma gerilmesi ve Bingham modeli parametreleri grafikleri.	78
Şekil 4.24 : Hava sürükleyici katkıların değerlendirilmesine yönelik akış şeması. ..	82
Şekil 5.1 : Agrega karışımına ait granülometri eğrisi.	86
Şekil 5.2 : Hava ölçerler.	88
Şekil 5.3 : Hava boşluğu sistemi analizleri için numunelerin hazırlanması.	89
Şekil 5.4 : Görüntü analizi cihazı.	90
Şekil 5.5 : Numune boyutları ve elde edilişi.	91
Şekil 5.6 : Donma-çözülme kabini.	92
Şekil 5.7 : Donma-çözülme çevrimleri.	92
Şekil 5.8 : Numune yüzeyinden zayıf parçaların uzaklaştırılması.	93
Şekil 5.9 : Dökülmüş malzemelerin filtreden geçirilmesi.	93
Şekil 5.10 : Teorik ve deneysel hava miktarları.	100
Şekil 5.11 : Sertleşmiş beton ve taze beton hava miktarları.	101
Şekil 5.12 : Aralık faktörünün hava miktarı ile değişimi.	102
Şekil 5.13 : Özgül yüzeyin hava miktarı ile değişimi.	102
Şekil 5.14 : Sertleşmiş beton kesitinde hava boşlukları.	103
Şekil 5.15 : Özgül yüzey ile aralık faktörü ilişkisi.	103
Şekil 5.16 : Hava miktarının katkı miktarı ile değişimi.	104
Şekil 5.17 : Taze beton hava miktarının pullanma hasarına etkisi.	104
Şekil 5.18 : Sertleşmiş beton hava miktarının pullanma hasarına etkisi.	105
Şekil 5.19 : Yeterli pullanma dayanıklılığına sahip beton yüzeyleri.	106
Şekil 5.20 : Pullanma hasarına uğramış beton yüzeyleri.	107
Şekil 5.21 : Pullanma hasarı ile aralık faktörü ilişkisi.	108
Şekil 5.22 : Pullanma hasarı ile özgül yüzey ilişkisi.	108
Şekil 5.23 : Pullanma miktarının çevrim sayısı ile değişimi.	109
Şekil 5.24 : BDEM'nin taze beton hava miktarı ile değişimi.	109
Şekil 5.25 : BDEM'nin sertleşmiş beton hava miktarı ile değişimi.	110
Şekil 5.26 : BDEM ile aralık faktörü ilişkisi.	110
Şekil 5.27 : BDEM ile özgül yüzey ilişkisi.	111
Şekil 5.28 : BDEM - pullanma grafiği.	111
Şekil 5.29 : Basınç dayanımının hava miktarı ile değişimi.	112
Şekil 5.30 : Mekanik özelliklerin hava miktarı ile değişimi.	112
Şekil 5.31 : Karışımlara ait elektriksel iletkenlik değerleri.	113
Şekil 5.32 : Elektriksel iletkenliğin hava miktarı ile değişimi.	113
Şekil 5.33 : Elektriksel iletkenlik ile aralık faktörü ilişkisi.	114
Şekil 5.34 : Elektriksel iletkenlik ile özgül yüzey ilişkisi.	114
Şekil 5.35 : Ultrases geçiş hızının hava miktarı ile değişimi.	115
Şekil 5.36 : Ultrases geçiş hızı – elektriksel iletkenlik grafiği.	115
Şekil 5.37 : Su emme hızının hava miktarı ile değişimi.	116

Şekil 5.38 : Su emme hızına hava miktarı ve S/Ç oranının etkisi.	116
Şekil 5.39 : İletilen elektrik akımı miktarının hava miktarı ile değişimi.	117
Şekil 5.40 : İletilen elektrik akımı miktarına hava miktarı ve S/Ç oranının etkisi. .	118
Şekil 6.1 : Buz çözücü tuz kullanılması durumuna göre donma-çözülme hasarları	121
Şekil 6.2 : Kritik aralık faktörünün donma hızı ile değişimi.	122
Şekil 6.3 : Numune boyutları ve elde edilişi.....	125
Şekil 6.4 : Ultrases geçiş hızı ölçümü.....	126
Şekil 6.5 : Donma-çözülme numunelerine epoksi emdirilmesi.....	128
Şekil 6.6 : Standart D/Ç çevrimi ve farklı deney koşullarına ait sıcaklık-zaman grafikleri.	129
Şekil 6.7 : Taze ve sertleşmiş beton hava miktarları.	133
Şekil 6.8 : Sertleşmiş beton kesitleri.....	134
Şekil 6.9 : Özgül yüzeyin hava miktarı ve aralık faktörü ile değişimi.	135
Şekil 6.10 : Pullanmanın çevrim sayısı ile değişimi.....	136
Şekil 6.11 : Karışımlara ait pullanma miktarları ve aralık faktörü değerleri.	138
Şekil 6.12 : Pullanma hasarının hava miktarı ile değişimi.	138
Şekil 6.13 : 55 kodlu karışıma ait 14 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen BDEM ve pullanma değerleri.	139
Şekil 6.14 : 55 kodlu karışıma ait 14 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen BDEM ve pullanma değerleri.	140
Şekil 6.15 : Donma hızı ile pullanma miktarı ilişkisi.	142
Şekil 6.16 : Farklı derinliklerde düzlem kesit görüntüleri.	143
Şekil 6.17 : Eşit donma-çözülme hasarlarına uğramış farklı beton kesitleri.	144
Şekil 6.18 : Düzlem kesitlerin optik mikroskop altındaki incelenmeleri.	145
Şekil A.1 : Bir hava boşluğu ve onu çevreleyen çimento hamuru tabakası.	163
Şekil A.2 : Bir hava boşluğu ve onu çevreleyen çimento hamuru tabakası.	164
Şekil A.3 : Bir doğrusal ölçüm kesiti örneği.	165
Şekil A.4 : Hava boşluk sisteminin modellenmesi.	167
Şekil B.1 : HSK - 1.....	168
Şekil B.2 : HSK - 2.....	168
Şekil B.3 : HSK - 3.....	169
Şekil B.4 : HSK - 4.....	169
Şekil B.5 : HSK - 5.....	170
Şekil B.6 : HSK - 6.....	170

HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN KARAKTERİZASYONU VE DENEY KOŞULLARININ BETONUN DONMA-ÇÖZÜLME HASARINA ETKİSİ

ÖZET

Dış koşullara açık beton elemanlarda ve betonarme yapılarda hava sıcaklığındaki değişimlere bağlı olarak donma-çözülme etkisi sonucu belirli şartlar altında hasar meydana gelmektedir. Hasarın nedeni beton içindeki boşluklarda donan suyun hacminin artması ve sertleşmiş betonun bu hacim değişkenliğine karşı koyamayarak çatlamasıdır. Hasarı önlemek için üretim aşamasında beton içerisine boyutları 10µm-1mm aralığında olan çok küçük çaplı ve belirli aralıklarla dağılmış küresel hava boşluklarının oluşmasını sağlayacak hava sürükleyici kimyasal katkılar ilave edilmektedir. Beton içinde oluşturulan bu hava boşlukları genleşen buz için hacim artışına olanak sağlayarak hasar oluşumunu engellemektedir. Donma-çözülme dayanıklılığı açısından en önemli etken, sürüklenmiş hava boşlukları olarak adlandırılan bu küçük çaplı küresel hava boşluklarıdır. Bu hava boşluklarının toplam miktarlarının, aralarındaki mesafelerinin ve boyutlarının donma-çözülme hasarı üzerindeki etkileri birçok araştırmaya konu olmuştur. Hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu oluşumuna ve donma-çözülme dayanıklılığına etkisi ise daha az incelenmiştir. Sunulan bu tez çalışmasında, farklı hava sürükleyici kimyasal katkıların hava boşluğu sistemi oluşumuna ve kararlılığına, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkileri araştırılmış, farklı deney koşulları altında donma-çözülme performansları incelenmiş, böylece literatürdeki boşluğun doldurulması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında hava sürükleyici kimyasal katkıların, kimyasal esaslarının hava boşluğu oluşumuna, kararlılığına ve hava sürükleyici katkıların betonlarda kullanılmadan önce performanslarının belirlenmesine yönelik araştırmalar yapılmıştır. Bu amaçla, literatürde yer alan köpük deneylerinin yanı sıra yüzey gerilimi ölçümleri de yapılmış hava boşluğu sistemi ile yüzey gerilimi değerleri arasındaki ilişkiler ortaya konmuştur. Taze ve sertleşmiş halde yapılan hava boşluğu sistemi analizleri sonucu reçine esaslı hava sürükleyici katkıların daha büyük boyutlu hava boşlukları oluşturduğu bununla beraber yüzey gerilimi ölçümleri sonucu bu katkıların yüzey gerilimini diğer katılara kıyasla daha az düşürdüğü belirlenmiştir. Reçine esaslı katkıların diğer katılara kıyasla daha kararlı boşluklar oluşturdukları köpük drenajı deneyi ve zamana bağlı yapılan hava miktarı ölçümleri ile belirlenmiştir. Bununla beraber, hava boşluğu kararlılığının katkı kimyasından önce çimento ile süperakışkanlatıcı katkı uyumu ve beton kıvamı gibi diğer etkenlere bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, hava sürükleyici katkıların performanslarının belirlenmesine yönelik yapılan deneylerin, süperakışkanlaştırıcı içeren betonlarda, çimento-katkı uyumsuzluğu nedeniyle yanıltıcı sonuçlar verebildiği görülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda, hava sürükleyici katkıların betonlarda kullanılmadan önce değerlendirilmesine ilişkin başlıca çalışmalar önerilmiştir.

Literatürde bazı hava sürükleyici katkıların yeterli hava miktarına sahip betonlar oluşturmalarına karşın bu betonların yeterli donma-çözülme performansı sağlamadığı

belirlenmektedir. Bu konunun araştırılmasına yönelik, 6 farklı kimyasal esasa sahip hava sürükleyici katkının ikişer farklı dozajda kullanılmasıyla betonlar üretilmiş ve bu betonlara EN 12390-9 standardında yer alan CDF (Capillary suction, Deicing salts and Freeze/thaw test) deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda yeterli hava boşluğu sistemine sahip olan betonlar donma-çözülme dayanıklılığı göstermiş, hava boşluğu sistemi yetersiz olan betonlar ise gösterememiştir. Çalışma sonucunda, betonların donma-çözülme performanslarının değerlendirilmesinde sadece hava miktarının yeterli olmadığı görülmüş ve nedenleri belirlenmiştir.

Donma-çözülme etkisi sonucu oluşan hasar, yüzeyden parça kopması veya malzeme dökülmesi (pullanma) şeklinde oluşabileceği gibi içsel mikro çatlakların oluşmasına bağlı dayanımın azalması (içsel hasar) şeklinde de meydana gelmektedir. Hasarın oluşumu üzerinde donma hızı, don altında geçen süre ve minimum sıcaklık gibi deney koşullarının etkileri farklı hipotezlerin öne sürülmesine neden olmuştur. Deneyisel çalışma kapsamında deney koşullarının etkileri, sıcaklık-zaman çevrimlerinin ayarlanabildiği bir deney cihazında ve gerçek ortam şartlarına daha uygun bir donma-çözülme deneyi olan CDF deneyine uygun olarak incelenmiştir. Deney koşullarının, iki farklı su/çimento oranı ve farklı hava miktarlarına sahip betonlarda oluşan hasar ve hasarın türü üzerine etkileri ortaya konmuştur. Buz çözücü tuz kullanılmasıyla pullanma hasarı baskın olmuş pullanmaya dayanıklı betonlarda içsel hasar oluşmamıştır. Betonların minimum sıcaklıkta bekletilmesinin pullanma hasarının artmasında en etkili deney koşulu olduğu bununla birlikte sürenin çok uzun olmasının belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Donma hızının yavaş olmasının pullanma hasarını arttırdığı ve en şiddetli pullanma deneyinin düşük donma hızında ve betonların minimum sıcaklıkta bekletilmesi ile oluşturulabileceği görülmüştür. Ayrıca, farklı hava sürükleyicilerin kullanıldığı ve farklı hava boşluğu sistemine sahip hava sürüklenmiş betonlar tüm deney koşullarında yeterli donma-çözülme performansı sergilemişlerdir.

Deneyisel çalışmalar sonucunda hava sürükleyici katkıların kimyasal esasının hava boşluğu sistemi oluşumu üzerindeki etkisi ve bir katkının betonlarda kullanılmadan önce performans deneyleri ile nasıl değerlendirilebileceği, sıkça kullanılan köpük deneylerinin yanında çalışma kapsamında uygulanan yüzey gerilimi ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Hava boşluklarının boyut dağılımlarının araştırılmasında civalı porozimetre deneyinin uygulanabilirliği, taze halde yapılan boşluk sistemi analizleri ile kıyaslanarak belirlenmiştir. Hava boşluğu sisteminin kararlılığı üzerinde belli başlı etkenler araştırılmış ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasının etkisi belirlenmiştir. Farklı hava sürükleyici katkıları kullanılarak oluşturulan hava boşluğu sistemlerinin, betonların mekanik özellikleri (basınç ve yarma-çekme dayanımları, elastisite modülü), iletkenlik özellikleri (elektriksel iletkenlik ve ultrases geçiş hızı) ve geçirimsizlik özellikleri (kılcal su geçirimsizliği - ASTM C 1585 ve elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi - ASTM C 1202) üzerindeki etkileri yapılan deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca, betonların donma-çözülme dayanıklılıkları üzerinde farklı kimyasal esasa sahip hava sürükleyici katkıları ile oluşturulan hava boşluğu sistemlerinin etkisi ve deney koşullarının hasar oluşumu ve hasarın türü üzerine etkileri belirlenmiştir. Böylece, sunulan bu çalışma ile hava sürükleyici katkıların taze halde hava boşluğu sistemi oluşumu ve sertleşmiş halde donma-çözülme etkisine karşı direnci incelenerek, donma-çözülme etkisine dayanıklı bir beton tasarımıdaki önemi ortaya konmuştur.

CHARACTERIZATION OF AIR ENTRAINING ADMIXTURES AND EFFECT OF TEST CONDITIONS ON FREEZING–THAWING DAMAGE OF CONCRETE

SUMMARY

Concrete structures exhibit damage due to freezing and thawing effect depending on temperature fluctuations in winter conditions. In saturated pores, the expansion of water due to freezing, forces the pores to expand and consequently cracking occurs. The air entraining admixtures (AEA) are used to prevent freezing and thawing damage. These admixtures generate air bubbles with a diameter of 10 μ m to 1mm which provide a space for ice expansion and therefore facilitate frost protection. Adequate air void system is the most important requirement for concrete in terms of freezing and thawing durability. In many studies, the parameters of the air void system were investigated and the importance and effectiveness of these parameters were revealed. Although, these parameters are controlled by the chemistry of the air entraining admixture and its interaction with the other constituents of concrete, the types and therefore the chemical contents of AEA's were less studied. In the presented thesis, effect of the type of AEA on the form and stability of bubbles, properties of fresh and hardened concrete and also freezing and thawing performances of the air void systems under different test conditions were investigated.

In this study, besides the effects of the type of air entraining admixtures on the form and stability of air voids, performances of these admixtures in concrete were also investigated. In practice and research papers in concrete literature, foam index and foam drainage tests were usually used in order to determine the performances of air entraining admixtures in concrete before casting. The foam index test is a basic and rapid way to determine the relative levels of AEA needed for air entrained concretes (especially if fly ash is used). The foam drainage test indicates the stability of a foam that has generated in a mixture. In addition to these tests, performances of AEA were investigated by surface tension measurements. For this purpose, a new test method was developed which depends on surface tension measurements according to the Du Nouy ring method.

In this research, a large number of test results were obtained from surface tension measurements and air void system analyses. All types of AEA's used in the scope of this research had a substantial influence on the surface tension. There is a significant relationship between the air void system and surface tension, however, it should also be noted that the parameters of air void system continue to changes even when the surface tension reaches a critical value beyond which it does not reduce. Although resin type of air entraining admixtures did not reduce the surface tension compared to the others, a sufficient air void system could be obtained using these admixtures as well. Distribution of entrained air void sizes varies with the type of admixture used for instance, while resin types of AEA's form coarser bubbles, synthetic and fatty alcohol types generate mid-sized and smaller bubbles, respectively. According to the

these results, it can be understood that the sizes of the air voids can be compared using surface tension measurements. In addition, the surface tension measurements can be useful in determining the admixture content that is needed to obtain a sufficient air void system in concrete.

Performances of AEA's were determined from foam tests and also from surface tension measurements. Amount of AEA to obtain a sufficient air void system, was determined by foam index test and surface tension measurements. In addition, surface tension measurements give information about size and stability of air voids. Stability of air void system was determined from foam drainage test. Although these tests can be useful for determining the performance of AEA, unexpected results can also be obtained because of cement-superplasticizer incompatibility. For this reason, performance tests need to be modified especially including the superplasticizer. A schematic presentation showing the main factors that affect the performance of AEA was composed at the end of the study.

It is well known that fly ash adversely affect the air entrainment because of its carbon content. In this work, it is shown that air entrainment is also affected by cement composition. In this experimental study, the effect of cement type and usage of fly ash was investigated. Three different cements with different alkali contents and a F type fly ash were used. As a result of performance and fresh concrete tests, it was found that when fly ash was involved, the amount of all types of AEA that needs to be used should be increased in order to obtain sufficient air void system. However, fly ash did not affect the stability of air void system. As expected, cement composition affected the performance of admixtures as well.

Effect of consistency of fresh concrete on the stability of air void system was also investigated. Apart from fresh concrete tests, consistencies of mixtures were also measured by concrete rheometer (ICAR Rheometer). Parameters of the rheological models of static and dynamic yield stress and plastic viscosity were determined by concrete rheometer. Hereby, consistencies of mixtures were controlled by both slump test results and rheological parameters. Air content of fresh concrete decreased with an increase in slump flow and a decrease in plastic viscosity. At low levels of consistency, air bubbles may coalesce to form larger bubbles that have a greater tendency to escape to the surface and burst. Air content of mixtures decreased in case where viscosities were decreased in time. In these mixtures, air voids were collapsed in the more rigid cement paste.

Some researches claim that they obtained inadequate freezing and thawing resistance with some types of AEA even if concrete contains high amounts of air. In an experimental study, concretes were produced using six different types of AEA in two different amounts. The amounts of cement, water and therefore the water/cement ratio were kept constant. As a result of this study, accomplishing an adequate air void system also taking in to consideration the type of AEA, is the most important requirement for concrete in terms of freezing and thawing durability. Total air content can be deceptive in determining the freezing and thawing resistance. Air void analysis should be made while the spacing factor and specific surface of air void system were should also be calculated. In addition, the effects of the parameters of air void system on the mechanical properties (compressive and splitting tensile strength, modulus of elasticity), permeability (chloride ion penetration by electrical

indication – ASTM C 1202, rate of absorption of water – ASTM C 1585) and conductivity (ultrasonic pulse velocity – ASTM C597-09 and electrical conductivity) of concretes were determined. Mechanical properties were negatively affected as the air content increased however, type of AEA did not influence the mechanical properties. Amount of air content and type of admixture did not influence the permeability of concretes. Chloride permeability and rate of water absorption of concretes were shown to be mainly depending on the permeability of concrete. Conductivity of concretes also decreased with the increasing air content.

The repeated freezing and thawing cycles are at the origin of the damage classified in two parts, internal deterioration and surface scaling. Internal cracking is normally observed as the loss of dynamic modulus of elasticity or dilatation, whereas surface scaling is defined as the scaling of particles from the surface. Mechanisms of damage were explained with respect to test conditions like freezing rate, minimum temperature and time at minimum temperature in the hypothesis. For instance, hydraulic pressure theory explains the increase in the internal deterioration due to the increase in freezing rate. In an experimental study, the effect of test conditions on the damage and type of deterioration were determined in air entrained and non-air entrained concretes. Freezing and thawing tests were performed according to CDF/CF test method which is described in TS EN 12390-9. In this set up, surface of the concrete is placed downward in the test solution in a container. The temperature cycle is controlled by heating, cooling and adjusting the flow rate of a glycol bath. The heat of the test solution is then transferred to and from the glycol bath. Three different types of AEA were used and the parameters of the air void systems of concretes were determined microscopically. Importance of air entraining in concrete in terms of freezing and thawing resistance was seen in the test results. All types of air entraining agents used facilitated the adequate freezing and thawing performance. It was also observed that deicing salts accelerate and increase the damage. Internal damage was seen only in the non-air-entrained concrete with a high water/cement ratio. In low water cement ratio concretes scaling occurred, but internal damage did not occur. In terms of scaling damage, slow freezing rate was more destructive compared to high freezing rate however high freezing rate is more destructive in the freezing thawing test in which the freezing medium was distilled or pure water. Time at the minimum temperature was determined to be the most severe test condition however very long duration time did not remarkably influence the damage. The results revealed that severe scaling tests can be conducted by applying a slow freezing rate and time at minimum temperature.

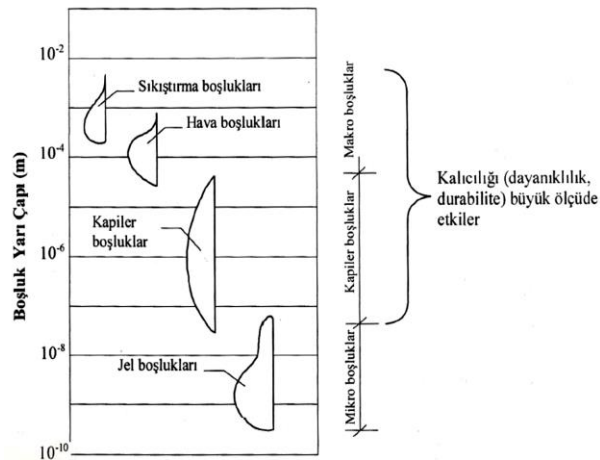
1. GİRİŞ

Kış aylarında hava sıcaklığına bağlı olarak yol, apron, köprü ayakları, kaldırım ve benzeri beton yapılarda donma çözülme etkisi sonucu hasar meydana gelmektedir. Bu hasar yüzeyden parça kopması veya malzeme dökülmesi (pullanma) şeklinde oluşabileceği gibi içsel mikro çatlakların oluşmasına bağlı dayanımın azalması (içsel hasar) olarak da görülebilir.

Hasarın nedeni beton içindeki boşluklarda donan suyun hacminin artması ve sertleşmiş betonun bu hacim değişkenliğine karşı koyamayarak çatlamasıdır. Hasarı önlemek için üretim aşamasında beton içerisine çok küçük çaplı, mikron mertebesinde küresel hava boşlukları oluşmasını sağlayacak kimyasal katkıları ilave edilmektedir. Beton içerisinde oluşan bu hava boşlukları genişleyen buz için hacim artışına olanak sağlayarak hasar oluşumunu engellemektedir.

1.1 Beton İçindeki Boşluklar ve Boyutları

Beton içerisindeki çeşitli boyutlarda boşluklar bulunmaktadır (Şekil 1.1). Bu boşlukların, miktarları, boyutları, doygunluk dereceleri, aralarındaki uzaklık ve beton içerisinde dağılımları betonların donma-çözülme etkisi sonucu oluşan pullanma ve içsel hasara karşı dayanıklılıkları açısından kritiktir.



Şekil 1.1 : Beton içerisindeki boşluklar ve boyut dağılımları (CEB, 1989).

1.2 Boşlukların Donma-Çözülme Dayanıklılığına Etkisi

Donma-çözülme dayanıklılığı için, betonun hava içeriğinin yüksek olması tek başına yeterli olmayıp, beton içinde yer alan boşlukların bazı özellikleri taşıması gerekmektedir.

Boşluk miktarının etkisi: Donma-çözülme hasarı çoğunlukla kapiler boşluklarda yer alan suların donmasıyla oluşmaktadır. Dolayısıyla kapiler boşluk miktarı azaldıkça hasar da azalacaktır. Kapiler boşluk hacmi, su/çimento oranı ve hidratasyon derecesinin fonksiyonudur (Çizelge 1.1 ve 1.2). Su/çimento oranı düştükçe büyük çaplı boşluk sayısı azalır. Ortalama boşluk boyutu ise hidratasyon derecesinin artmasıyla azalmaktadır.

Çizelge 1.1 : Powers-Brownyard modeline göre hesaplanan poroziteler (Taylor, 1992).

Su/çimento	Hidratasyon oranı	Kapiler porozite	Jel porozitesi	Toplam su porozitesi
0,3	0,00	0,49	0,00	0,49
0,3	0,79	0,00	0,27	0,27
0,4	0,00	0,56	0,00	0,56
0,4	1,00	0,03	0,29	0,32
0,5	0,00	0,61	0,00	0,61
0,5	1,00	0,15	0,26	0,41
0,6	0,00	0,65	0,00	0,65
0,6	1,00	0,24	0,23	0,47

Çizelge 1.2 : Su/çimento oranı ve hidratasyon derecesine bağlı kapiler poroziteler (Pigeon ve Pleau, 2006).

Su/çimento oranı (ağırlıkça)	Kapiler porozite (hacimce), %	
	% 50 hidratasyon derecesinde	% 75 hidratasyon derecesinde
0,40	31	18
0,50	39	28
0,60	46	36

Boşluk boyutunun etkisi: Beton içinde bulunan su küçük çaplı boşluklarda büyük boşluklara kıyasla daha düşük sıcaklıklarda donmaktadır, örneğin jel boşluklarındaki su -78 °C’de donarken (Powers ve Brownyard, 1948), kapiler boşluklardaki su 0 °C’nin hemen altında donmaktadır. Aşağıdaki bağıntılarda (Denklem 1-3) boşluk çapı donma sıcaklığı ilişkisi termodinamik açıdan incelenmektedir.

$$\Delta\mu \approx \Delta T \cdot \Delta S_{fv} \quad (1.1)$$

Burada, $\Delta\mu$ kimyasal potansiyel, ΔT sıcaklık farkı ve ΔS_{fv} füzyonun molar entropisidir.

$$\Delta S_{fv} = (S_L - S_C) / V_C \quad (1.2)$$

Burada, S_L sıvının molar entropisi, S_C kristalin molar entropisi ve V_C kristalin molar hacmidir.

Kristalin büyüme ve büzülmesi olmaksızın sıcaklığı (entropi sabit);

$$T = T_m - \frac{\gamma_{CL} * K_{CL}}{\Delta S_{fv}} \quad (1.3)$$

Burada, T_m kristalin ergime sıcaklığı, γ_{CL} kristal/sıvı arayüzey özgül enerjisi ve

K_{CL} kristal/sıvı arayüzey eğrilik yarıçapıdır. Küre için $\Rightarrow K_{CL} = 2/(r_p - \delta)$.

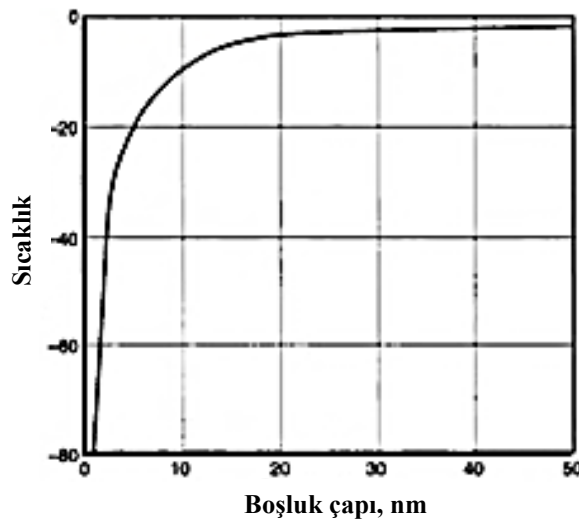
Örneğin; kristal ve boşluk duvarı arasındaki sıvı film tabakası kalınlığı (δ) = 0,9 nm, $\gamma_{CL} = 0,04 \text{ J/m}^2$, $\Delta S_{fv} = 1,2 \text{ J/(cm}^3 \cdot \text{K)}$ olmak üzere aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$r_p = 33 \text{ nm} \rightarrow \Delta T = 2^\circ \text{C}$$

$$r_p = 13 \text{ nm} \rightarrow \Delta T = 5^\circ \text{C}$$

$$r_p = 7 \text{ nm} \rightarrow \Delta T = 10^\circ \text{C}$$

Buradan, boşluk yarı çapı küçüldükçe buzun ergime noktasının azaldığı görülmektedir (Scherer ve Valenza, 2004). Kapiler boşluk çapı ile bu boşluklarda buz oluşumunun meydana geldiği sıcaklık arasındaki ilişki ise Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2 : Kapiler boşluk çapı donma sıcaklığı ilişkisi (Pigeon ve Pleau, 2006).

Doygunluk derecesinin etkisi: Suyun buz haline dönüşmesi sonucu oluşan hacim artışını karşılayacak kadar yer bulunduran boşluklar donma-çözülme etkisi sonucu hasara sebep olmazlar. Suyu doymuş durumdaki betonlarda donma hasarı çok daha şiddetli olmaktadır. Buzun yoğunluğu $0,917 \text{ gr/cm}^3$ 'tür, $+4^\circ\text{C}$ 'de $1 \times 1 \times 1 = 1 \text{ m}^3$ suyun donması sonucunda her üç doğrultuda boyut a kadar artarsa; $0,917 \times (1+a)^3 = 1$ yazılır ve buradan, $(1+a)^3 = 1/0,917 = 1,087$ elde edilir. Bu da suyun donması sonucunda hacminde yaklaşık %8,7 artış meydana geldiğini göstermektedir.

V_b , cismin içindeki boşlukların hacmi ve α , birden küçük bir katsayı olmak üzere;

$V_b \times \alpha =$ Boşlukların tamamen su ile dolmaması halinde su miktarı ve,

$V_b \times \alpha \times 1,087 =$ Suyun donması sonucu meydana gelen buz hacmi olmak üzere eğer;

$V_b \times \alpha \times 1,087 < V_b$ ise hacim artışı su ile dolu olmayan boşluk tarafından karşılanır, hasar oluşmaz.

$V_b \times \alpha \times 1,087 \geq V_b$ ise boşluk hacim artışını karşılayamaz ve hasar oluşur. Hasarı başlatan α_{kr} değeri $V_b \times \alpha_{kr} \times 1,087 = V_b$ eşitliğinden 0,919 bulunur.

Yukarıda tanımlanan α_{kr} değerine kritik doygunluk derecesi denir. Araştırmacılara göre beton bileşimine bağlı olan için kritik doygunluk derecesi 0,70-0,80 arasında değişmektedir.

Boşluklar arasındaki mesafe: Donma-çözülme dayanıklılığında boşluklar arasındaki mesafenin önemi büyüktür. Powers (1945), hidrolik basınç hipotezinde boşluktaki suyun donmaya başlaması ve hacminin artması ile boşlukta yer kalmaması sonucu henüz donmamış suyun boşluktan atılması esnasında oluşacak hidrolik basıncın betonda don hasarı oluşturmaması için, donmamış suyun yeteri kadar yer bulunduran başka bir boşluğa ulaşması gerektiğini savunmuştur.

Powers, 1945 yılında sunduğu hipotezinin 1949 (Powers ve Willis, 1949) yılında yaptığı çalışmasında beton içinde sürüklenen hava boşluklarını küresel, eşit çapta ve düzgün dağılmış olarak modelleyerek, donma-çözülme etkisi altında hasar oluşmaması için çimento hamurundaki herhangi bir noktanın boşluk kenarlarına olan ortalama maksimum mesafesi olarak aralık faktörü (spacing factor)'nü tanımlamış ve aşağıdaki formülleri geliştirmiştir.

$$p/A < 4,33 \Rightarrow L = \frac{p}{\alpha A} \quad (1.4)$$

$$p/A \geq 4,33 \Rightarrow L = \frac{3}{\alpha} \left(1,4 \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

burada, L aralık faktörü (mm), p hamur hacmi (toplam hacmin %'si), A hava miktarı (toplam hacmin %'si) ve α özgül yüzeydir (mm^2/mm^3). Bu formüllerin çıkarımları Ek A'da sunulmaktadır.

Boşlukların beton içerisinde dağılımları: İyi bir dağılım aralık faktörünü etkilediği için önemlidir. Boşlukların bir bölgede yoğunlaşmaları beton dayanımını olumsuz etkilerken, yüzeye yakın bölgelerde olması ise pullanma dayanımını artırır, pullanma hasarının sebeplerinden bir tanesi gereğinden fazla yapılan mastarlama veya çelik mala ile mastarlama sonucunda yüzeyde yeterince boşluk bulunmamasıdır (Şahin, 2003). Ayrıca, boşlukların donatı veya agrega etrafında yoğunlaşmaları yerel hasarlar oluşturabilir.

1.3 Tezin Amacı

Donma-çözülme hasarı, fiziksel esaslı bir dürabilite problemidir. Konu üzerine ilk çalışmalar hasarın nedeninin hipotezlerle açıklanmasına yönelik olmuştur. Daha sonra araştırmacılar, S/Ç oranı, çimento inceliği, ince agrega konsantrasyonu, hava miktarı ve benzeri bir çok bileşen ve bileşim oranının hasar üzerindeki etkilerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise donma-çözülme hasarının sayısallaştırılmasıyla servis ömrü tahminine yöneliktir.

Donma-çözülme dayanıklılığı açısından hasarın oluşmasını önlemede en önemli etken, beton içinde bulunan ve boyutları mikron mertebesinde olan küresel hava boşluklarıdır. Bu hava boşluklarının toplam miktarlarının, aralarındaki mesafelerinin ve boyutlarının donma-çözülme hasarı üzerindeki etkileri birçok araştırmaya konu olmuştur. Hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu oluşumuna ve donma-çözülme dayanıklılığına etkisi ise daha az incelenmiştir. Ayrıca, son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle kimyasal katkılarda gelişmeler kaydedilmiş ve çeşitleri artmıştır.

Yukarıda belirtilen hususlar göz önüne alındığında, sunulan bu tez çalışmasında, farklı hava sürükleyici kimyasal katkıların hava boşluğu sistemi oluşumuna ve kararlılığına, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkilerini araştırmak ve farklı

deney koşulları altında donma-çözölme performanslarını incelemek, böylece literatürdeki boşluğu doldurmak amaçlanmıştır.

1.4 Tezin Planı

Literatürde yer alan çok sayıda çalışma, donma-çözölme etkisine dayanıklı bir beton tasarımının öncelikle yeterli hava boşluğu sistemine sahip olması gerektiğini göstermiştir. Tezin amacına uygun olarak hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının, taze betonlarda hava boşluğu sistemi oluşumuna ve kararlılığına, sertleşmiş betonlarda oluşturdukları hava boşluğu sistemlerinin beton özelliklerine ve farklı deney koşulları altında donma-çözölme hasarı üzerine etkileri yapılan 4 farklı deneysel çalışma ile araştırılmıştır (Şekil 1.3).

Literatür çalışmaları 1. ve 2. Bölümlerde verilmekte olup, birinci bölümde beton içindeki boşluk yapısı ve boşluk miktarının, boyutunun ve doygunluk derecesinin donma-çözölme dayanıklılığına etkileri, ikinci bölümde ise hava sürüklenmiş betonlar başlığı altında, betonda hava boşluğu oluşumu, hava sürüklemenin beton özelliklerine etkileri ve hava sürüklemeyi etkileyen parametreler işlenmiştir.

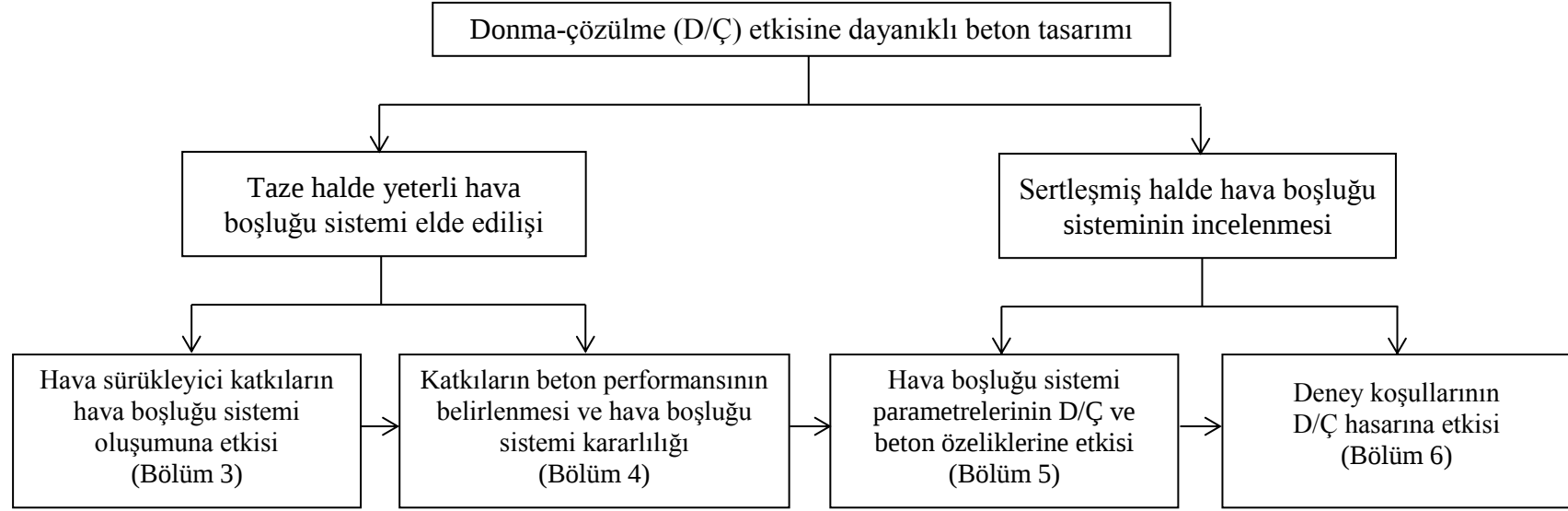
Üçüncü bölümde; hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu sistemi oluşumuna etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, yüzey gerilimi ölçümleri yapılarak, oluşan hava boşlukları ile yüzey gerilimi değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Dördüncü bölümde; hava sürükleyici katkı performanslarının betonda kullanılmadan önce ön deneylerle belirlenmesi ve hava boşluğu sistemi kararlılığı üzerinde hava sürükleyici katkı kimyası, uçucu kül kullanımı, beton kıvamı ve çimento tipinin etkileri belirli sürelerde reometre ve hava miktarı ölçümleri yapılarak araştırılmıştır.

Beşinci bölümde; hava boşluğu sistemi parametrelerinin ve hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının, betonların başta donma-çözölme dayanıklılığı olmak üzere mekanik, iletkenlik ve geçirimlik özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

Altıncı bölümde; farklı su/çimento oranına ve farklı hava miktarına sahip betonlar çeşitli deney koşullarında donma-çözölme deneylerine tabi tutularak donma hızının, don altında geçen sürenin, minimum sıcaklıkta bekleme süresinin ve çevrim süresinin içsel ve yüzeysel donma hasarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yedinci bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen genel sonuçlar sunulmuştur.

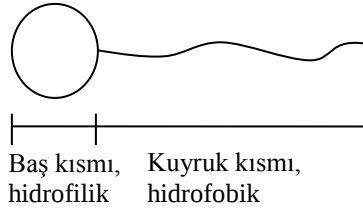


Şekil 1.3 : Tez planı.

2. HAVA SÜRÜKLENMİŞ BETONLAR

Beton teknolojisinde hava sürükleyici katkıları (HSK) olarak adlandırılan yüzey aktif kimyasalların kullanılmasıyla beton içerisinde boyutları 10 µm ile 1 mm arasında değişen küresel hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu hava kabarcıkları beton üretilirken karıştırma işlemi sırasında karıştırıcı paletlerinin yaptığı mekanik etki sonucu oluşmakta ve HSK molekülleri tarafından kararlılıkları ve stabiliteleri sağlanmaktadır.

HSK molekülleri su seven (hidrofilik) baş kısmından ve su sevmeyen (hidrofobik) kuyruk kısmından meydana gelmektedir (Şekil 2.1). Baş kısmın elektriksel yükü; negatif (-) ise anyonik, pozitif (+) ise katyonik, nötr ise nan-iyonik ve hem negatif hem de pozitif yüklü ise amfoterik olarak adlandırılırlar (Myers, 2006).

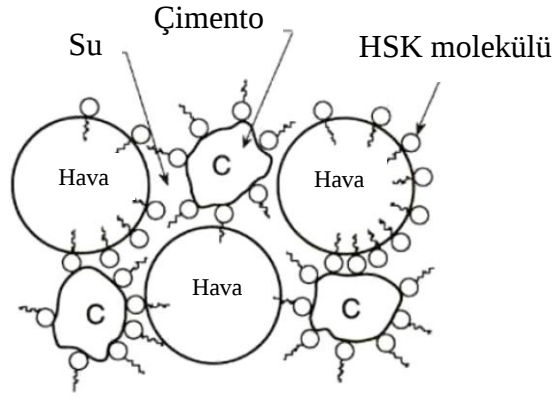


Şekil 2.1 : Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı.

2.1 Betonda Hava Boşluğu Oluşumu

Beton içinde oluşan hava kabarcıkları yüksek içsel basınçtan dolayı büyümekte ve beton yüzeyine ulaştığında ise bu basınç etkisiyle yok olmaktadır. HSK'lar suyun yüzey gerilimini düşürerek kabarcık oluşumunu kolaylaştırmakta ve mekanik deformasyonlara karşı daha kararlı hale getirmektedirler (Whitting ve Nagi, 1998; Nagi ve diğ., 2007).

Hava kabarcıkları beton içinde birleşerek daha büyük boyutlu kabarcık oluşturabilirler, bunun sonucunda, hem betondan çıkma eğilimleri yüksek olur hem de mekanik etkilere karşı daha dirençsiz olurlar. Whitting ve Nagi (1998) boşlukların stabilitesinin hidrofilik özellikteki baş kısmının çimento tanelerine tutunmasıyla sağlandığını belirtmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : HSK moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları.

Dodson (1990) hava boşluklarının stabilitesinin elektrostatik itme kuvvetlerinin boşlukları birbirinden ayrı tutmasıyla sağlandığını belirtmektedir. Boşluk yüzeyine adsorplanan HSK molekülleri suda kalan baş kısımları ile boşluk çevresinde film oluşturmaktadır. Moleküller yüklü ise boşlukta aynı yüke sahip olur ve elektrostatik itme kuvvetleri boşlukları birbirinden ayırır ve birleşmelerini engeller (Dodson, 1990).

Bazı araştırmacılar, vinsol reçinesi, sodyum adipat ve sodyum oleat esaslı HSK'ların suyun yüzey gerilimini düşürmediğini bu katkıların kalsiyum hidroksit çözeltisi ile reaksiyona girerek çözünmez kalsiyum tuzları oluşturduğunu ve oluşan bu tuzların hava, su ve çimento ara yüzeyinde birikmesiyle hava sürüklemenin gerçekleştiğini ve boşlukların kararlılıklarının sağlandığını belirtmektedir (Friberg, 1976; Chatterji, 2003).

2.2 Hava Boşluğu Sistemi

Hava boşluğu sistemi; hava miktarı, hava boşluklarının özgül yüzeyi ve aralık faktörü ile karakterize edilir.

Hava miktarı (%) : Hava hacminin toplam hacme oranıdır.

Özgül yüzey (mm^2/mm^3) : Hava boşluklarının toplam yüzey alanının hava boşluğu hacmine oranıdır.

Aralık faktörü (mm) : Çimento hamuru içindeki bir noktanın hava boşluklarının kenarlarına olan ortalama maksimum mesafesidir. Bu parametreler hesaplanırken, bütün hava boşluğu çaplarının aynı olduğu ve çimento hamuru içinde eşit olarak dağıldığı kabul edilmektedir.

2.3 Hava Sürüklemenin Beton Özelliklerine Etkileri

İşlenebilirlik: Hava sürükleme hem hamur hacminin artmasından dolayı, hem de çimento tanesi ile agrega arasındaki sürtünmeyi azaltmasından dolayı işlenebilirliği iyileştirmektedir.

Basınç dayanımı: Hava miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Her %1'lik hava miktarı artışı için basınç dayanımı yaklaşık %6-10 arasında azalmaktadır (Kosmatka ve diğ., 2002).

Elastisite modülü ve eğilme dayanımı: Her %1'lik hava miktarı artışı için betonların elastisite modülü ve eğilme dayanımı değerlerinde yaklaşık %2-6 arasında azalma olmaktadır.

Hava sürükleme, sülfat ve alkali silika etkilerine karşı dayanıklılığı artırırken, rötre, sünme, yorulma ve aşınma dayanımlarına çok az etki etmektedir (Camposagrado, 2006).

2.4 Hava Sürüklemeyi Etkileyen Parametreler

Hava boşluklarının oluşmasını ve kararlılığını çok sayıda parametre etkilemektedir. Bundan dolayı, bu parametreleri birbirlerinden ayrı düşünmek olayı basitleştirir. Bu parametreler;

1. Betonlu oluşturan malzemelerin etkileri,
2. Karışım kompozisyonu ve karakteristiğinin etkisi,
3. Dış etkenler (karıştırma, yerleştirme, yüzey düzeltme)'dir.

2.4.1 Betonlu oluşturan malzemelerin etkileri

Çimento: Çimento dozajının artması hava miktarını azaltır. Çimentonun etkisi fiziksel ve kimyasal açıdan incelenmelidir.

Fiziksel etki;

Çimento inceliği arttıkça su ile çevrilen yüzey alanı artmakta, buna karşılık hava boşluğu oluşması için gerekli su miktarı azalmakta ve sonuçta hava sürükleme güçleşmektedir. Çimento inceliği arttıkça oluşan bu etkilerden dolayı, kullanılacak katkı dozajı artırılarak yeterli hava boşluk sistemi sağlanabilir.

Kimyasal etki;

C₃A, alçı ve çözünür alkaliler (genellikle sülfatlar) çabuk reaksiyona girer ve etrenjit (31 molekül su ve iğne yapılı) oluştururlar. Etrenjit oluşumu da viskoziteyi artırmaktadır. Etrenjit oluşumu hızlı ise yüksek viskoziteden dolayı hava boşluk sistemi olumsuz etkilenir. Eğer, yavaş ve kısa taneli birincil etrenjitler zamanla uzun iğneli hale dönüşüyor ise yani ikincil etrenjit oluşumu var ise, bu durumda da boşluk sisteminde stabilite problemleri oluşur (Regourd, 1982).

Alkaliler çözeltideki kalsiyum miktarını azaltır, böylece boşluk çevresinde membran (zar) oluşturacak katkı miktarı artar bundan dolayı hava miktarı artar. Bununla birlikte, oluşan boşluklar daha az kararlı olmaktadır (Mielenz ve diğ., 1958; Farkas, 1964).

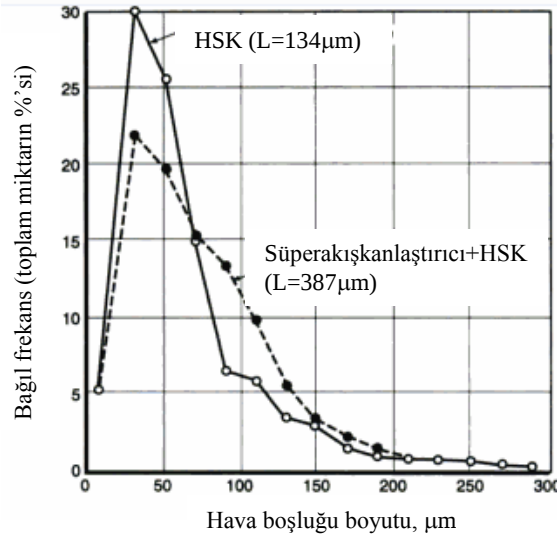
Su: İçme suyundaki kalsiyum karbonat mineralinin, suyun sabun ve deterjan çözme kabiliyetini azaltması sebebiyle hava sürüklemeyi etkileyebileceği düşünülmektedir (Whitting ve Stark, 1983).

Agrega: Maksimum tane çapı arttıkça hamur hacmi azalır, bunun sonucunda sürüklenen hava miktarı azalmaktadır. İri agregaların hava sürüklemeye etkisi çok azdır. İri agrega miktarı arttıkça rijitlik artar, bundan boşluk sistemi dolaylı olarak etkilenir. Kırmataş kullanılan betonlar, çakıl kullanılanlara kıyasla daha az hava içermektedir. İri agregaların yüzeyindeki tozlar hava miktarını azaltmaktadır.

İnce agrega miktarı arttıkça hava kabarcıklarının karışımdan çıkması önlenir. Burada asıl etki viskozitenin üzerinedir. Viskozite ise doğrudan, boşluk sisteminin oluşmasını etkiler. Yeterli hava sürüklenmiş karışımda ince agrega granülometrisi çok önemli değildir. Bununla birlikte ince agrega etkisi tam olarak açığa çıkarılmamıştır (Pigeon ve Pleau, 2006).

Kimyasal katkılar: Süper akışkanlaştırıcılar boşluk yapısını 2 yolla etkiler; i) Hamur akışı kolaylaştıkça boşlukların birleşmesi kolaylaşır. ii) Çimento tanelerinin birbirlerini itme kuvvetini artırır, böylece boşlukların birleşmesini önleyici olan hamur kabuğu zayıflar. Bu etkilerinden dolayı melamin ve naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcılar birkaç istisna hariç, aralık faktörünü artırır, özgül yüzey ve hava miktarını azaltır. Lignosülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcılar yüzey aktif katkılardır yani hava sürükleyici etki yaparlar, fakat oluşan hava boşlukları daha az

kararlıdır. Süper akışkanlaştırıcı katkılar sürüklenen hava miktarını azaltırken, boşluk boyut dağılımını etkilememektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Hava boşluğu boyut dağılımı (Pleau ve diğ., 1990).

Litvan (1983), süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile hava sürüklemenin, çapları 0,35-2µm arası olan boşluklar hariç, olumsuz etkilendiğini ama bu değerlerde olumlu etkilendiğini belirtmiştir.

Bazı su azaltıcı katkılar, özellikle kalsiyum lignosülfonatlar içerenler, hava sürükleyici etki yaparlar. Su azaltıcıların normal dozajda kullanılmasında sorun yok iken dozaj arttıkça geciktirici özellik göstereceğinden stabilite problemleri oluşabilir.

Priz geciktirici katkıların hava sürüklemeye belirgin etkileri yoktur. Bu katkıların hava boşluk yapısının değişebileceği zaman aralığını uzatmasından dolayı havanın küçük boşluklardan büyük boşluklara dönüşebileceği düşünülmektedir (Mielenz, 1968).

Priz hızlandırıcı katkıların etkisi ile ilgili yeterli bilgi yoktur. Fakat priz süresini uzatan her türlü etkenin, dolaylı olarak küçük çaplı boşlukların kaybolmasını sağladığı söylenebilir.

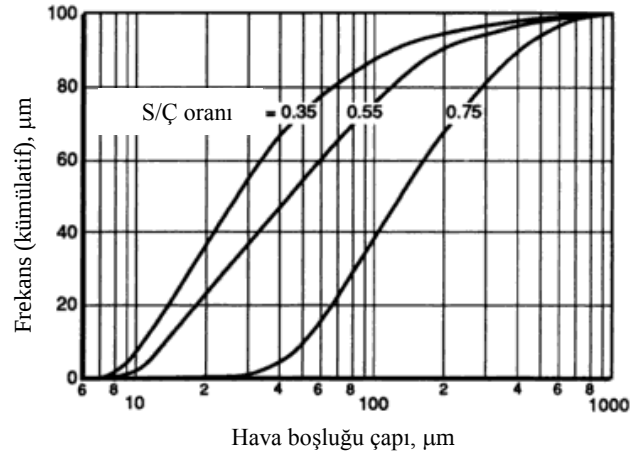
Kimyasal katkıların hava sürükleme üzerine etkisi konusunda bir çok araştırmacı, asıl önemli olanın katkı ile çimento arasındaki uyum olduğunu belirtmişlerdir.

Mineral Katkılar: Mineral katkıların hava sürükleme üzerindeki etkileri çimento ile fiziksel olarak benzerdir. Hatta, silis dumanı tane boyutu çimentonunkinden 100 kat daha ince olduğundan daha çok etkiler ve katkı dozajını aşırı arttırmak gerekebilir

(Whiting ve diğ., 1993). Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun inceliğinin artmasıyla hava miktarı azalmaktadır. Uçucu kül ve silis dumanı karbon içerebilirler. Karbon taze betonda daha kaba boşluklar oluşmasına ve stabilite problemlerine yol açar, çünkü karbon zamanla hava sürükleyici katkıları engelleyerek kademeli olarak hava sürükleyici katkı miktarını azaltmaktadır (Gebler ve Klieger, 1983).

2.4.2 Karışım kompozisyonu ve karakteristiğinin etkisi

Bilindiği üzere, S/Ç oranının düşmesiyle boşluk miktarı azalmaktadır. Bunun sebebi ortamda hava boşluğu oluşturacak daha az miktarda su olmasıdır. Bileşimde, hava sürüklemeyi etkileyen en önemli parametre S/Ç oranıdır, hamur ve agregâ içerikleri dolaylı etkimektedir. Çimento dozajının artması ise hava miktarını azaltmaktadır. S/Ç oranının azalmasıyla daha viskoz hale gelen hamurda, hava boşluklarının birleşme riski azalır. Bunun sonucunda hava boşluklarının boyutları da azalmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : S/Ç oranı hava boşluğu çapı ilişkisi (Backstrom ve diğ., 1958).

Su/çimento oranı 0,25 gibi çok düşük olduğunda hava sürüklemek muhtemeldir. Fakat, çok miktarda süper akışkanlaştırıcı içerirdiklerinden 200 µm boşluk faktörü elde etmek zordur. Bundan dolayı, hava sürükleyici dozajı normalin 10 katına erişmektedir (Aitcin ve diğ., 1993).

Çökme (slump) hava sürüklemeyi kontrol etmede önemli bir parametre olarak belirtilmektedir. Çökme az, rijitlik fazla, hava sürükleme zor ve çökme fazla, hamur akışkan, hava boşluklarının birleşme riski yüksek ilişkileri kurulabilir. Ama, çökmenin etkisi dolaylı olduğundan (su içeriğine ve S/Ç'ye bağlı) değerlendirme yapmak zordur.

Taze beton sıcaklığı birçok katkı üreticisine göre hava miktarını doğrudan etkilemektedir. Aynı katkı dozajında sıcaklığı düşük olan beton daha fazla hava içermektedir. Bundan dolayı, katkı üreticileri soğuk havada katkı dozajını azaltır. Katkı dozajının azalması ise aralık faktörünün artmasına neden olur. Saucier ve diğ., (1990) sıcaklığın aralık faktörünü değil sadece hava miktarını etkilediğini belirtmektedir. Sıcaklığın 21°C'den 38°'ye çıkmasıyla hava miktarı %25 azalırken, 4°C'ye düşmesiyle %40 artar (Whitting ve Nagi, 1998). Bu bilgiler ışığında, katkı dozajı beton sıcaklığına göre ayarlanmalıdır.

2.4.3 Karıştırma, yerleştirme ve yüzey düzeltme işlemlerinin etkileri

Genelde karışım süresi arttıkça daha homojen bir karışım elde edileceği düşünülmektedir. İyi karıştırıcılar büyük boşlukları ufaltarak daha küçük boşluklar oluşturur. Transmikserlerde çalkalanmanın ve bekleme süresinin hamurda meydana gelecek fiziksel ve kimyasal değişikliklerden başka etkisi yoktur. Taşıma sırasında hava kaybı olacaktır ama bu hava kaybı büyük boşluklarda olduğundan aralık faktörü üzerinde etkisi çok az olmaktadır.

Kıvamı tekrar sağlamak için su verilmektedir veya hava miktarını artırmak için hava sürükleyici katkı miktarı arttırılmaktadır. Bunlar yanlış ama sık yapılan uygulamalardır. Katılan su çok az ise aralık faktörüne etkisi azdır, fakat akışkanlık artarsa boşlukların birleşmesi kolaylaşır böylece stabilite problemleri oluşur. Hava sürükleyici katkı dozajı arttırılarak hava miktarının %1 oranında artırılması da aralık faktörüne etki etmemektedir.

Sıkıştırma ve yerleştirme işlemleri beton içinde istenmeyen boşlukları atmak amacıyla yapılmaktadır. Vibrasyon büyük boşlukları ve hapsolmuş havayı attığından yeterli hava sürüklenmiş betonda aralık faktörünü az miktarda etkilemektedir (Simon ve diğ., 1992).

Pompalama hava miktarının % 2-3 mertebelerinde azaltabilirken, aralık faktörünü değiştirmez ve donma-çözülme dayanıklılığına çok az etki eder. Uzun mesafelere pompalama hava miktarını azaltır. Aralık faktörü üzerinde etkisi için yeterli veri bulunmamaktadır.

Yüzey düzeltme işlemlerinin yüzey boşluk yapısında meydana getirdiği değişiklikler üzerinde çok az bilgi vardır. Tahta mala ile yapılan hafif düzeltme en iyi yöntem olarak önerilmektedir. Çelik mala ile yapılan aşırı düzeltme hava boşluklarını yok

ettiği için pullanma dayanımını azaltmaktadır. şahin (2010), yaptığı çalışmasında dökümden 1-1,5 saat sonra yapılan ikinci mastarlamanın ilk çevrimlerde pullanma dayanımını arttırdığı, çevrim sayısının artmasıyla ise pullanma dayanımını azalttığını elde etmiştir. Bu çalışmada pullanma dayanımının azalmasına ikinci mastarlama nedeniyle yüzeyde bulunan sürüklenmiş hava boşluklarının tahrip olması gösterilmiştir.

3. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN KİMYASAL ESASLARININ HAVA BOŞLUĞU SİSTEMİ OLUŞUMUNA ETKİSİ

3.1 Giriş

Donma-çözülme etkisi altındaki betonlarda hasarı önlemede en etkili yöntem hava sürüklemedir. Betonun geçirimsizliğini ve dayanımını arttırmaya yönelik yapılan düşük su/çimento oranı, mineral katkı kullanımı ve benzeri yöntemler ise ikincil derecede etkilidir. Betonda hava boşluğu oluşumu ve hava sürüklemeye etki eden parametreler Bölüm 2’de ele alınmıştır. Bu bölümde ise hava boşluğu oluşumunu sağlayan hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu sistemi oluşumu üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

Donma-çözülme dayanıklılığı üzerine çalışan birçok araştırmacı çalışmalarında tek tip hava sürükleyici katkı kullanmıştır. Örneğin, Powers’ın ozmotik basınç hipotezini beraber öne sürdüğü Helmuth, tüm çalışmalarında sadece vinsol reçinesi esaslı hava sürükleyici katkı kullanmıştır (Chatterji, 2003). Hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının etkisi ise ilk olarak Krejier (1967) ve Mielenz (1968) tarafından araştırılmıştır. 1980’lerin başlarına kadar betonlarda çoğunlukla ağaç reçinesi tuzları veya nötralize vinsol reçinesi esaslı hava sürükleyici katkılar kullanılmıştır (Edmeades ve Hewlett, 1986). Son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle kimyasal katkılarda gelişmeler kaydedilmiş ve çeşitleri artmıştır. Günümüze daha yakın tarihli bir çalışmada yaygın olarak kullanılan hava sürükleyici katkılar ve betonlar üzerindeki performans karakteristikleri sunulmuştur (Çizelge 3.1).

Hava sürükleyici katkıların betonlardaki performansları yaygın olarak köpük deneyleri ile belirlenmektedir. Katkı performanslarının belirlenmesinde yüzey gerilimi ölçümleri, hava sürükleyici katkıların hava boşluğu oluşumunu karışım suyunun yüzey gerilimini düşürerek gerçekleştirdiği bilinmesine rağmen daha az kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda yüzey gerilimi ölçümleri daha sık yer almış ve köpük indeksi deneyi ile birlikte değerlendirmelerde kullanılmıştır (Ansari ve diğ., 2002; Du ve Folliard, 2005; Pedersen ve diğ., 2007; Kligys ve diğ., 2007; Atahan ve diğ., 2008).

Çizelge 3.1 : Yaygın olarak kullanılan hava sürükleyici katkıların sınıflandırılması ve performans karakteristikleri (Whiting ve Nagi, 1998).

Sınıf	Kimyasal tanımı	Performans karakteristiği
Ağaç türevi asit tuzları	Alkali veya alkanolamin tuzlar	-
Vinsol reçinesi	Trisiklik asit, fenolikler ve terpene karışımı	Hızlı kabarcık oluşumu. Başlangıçtaki karıştırma ile az hava kazancı. Uzun karıştırma süresi sonucu hava kaybı. Orta boyutlu kabarcık oluşumu. Diğer kimyasal katkıların çoğunluğuyla uyumlu.
Ağaç reçinesi	Trisiklik asit- esas veya minör bileşen	Vinsol reçinesi ile benzer
Tall yağı	Yağ asiti- esas bileşen Trisiklik asit- minör bileşen	Yavaş hava oluşumu. Karıştırma süresi arttıkça hava miktarı artabilir. Çok küçük çaplı kabarcık oluşumu. Diğer katkıların çoğunluğuyla uyumlu.
Bitkisel yağ asitleri	Hindistan cevizi yağı asiti, alkanolamin tuz	Ağaç reçinesine kıyasla daha yavaş ve daha kaba kabarcık oluşumu. Karıştırmada orta şiddette hava kaybı. Diğer kimyasal katkıların çoğunluğuyla uyumlu.
Sentetik deterjanlar	Alkil-aril sülfonatlar, ve sülfatlar (sodyum dodesil benzen sülfonat)	Hızlı kabarcık oluşumu. Karıştırmada çok az hava kaybı. İri boşluk oluşumu. Yüksek oranda su azaltıcı katkıların bazılarıyla uyumsuz.
Diğer	Lignosülfatların alkali/alkanolamin tuzları, Oksijenlenmiş petrol atıkları, Proteinsel malzemeler, Donmuş hayvan yağı	Bu katkılar, günümüzdeki beton uygulamalarında nadir olarak kullanılmaktadır.

3.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı

Çalışmada hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu sistemi oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmak amaçlanmıştır. Ayrıca, literatürdeki çalışmalarda yer alan köpük deneylerinin yanında yüzey gerilimi ölçümleri de yapılarak, yüzey gerilimi ölçümlerinin hava sürükleyici katkıların performanslarını değerlendirmede bir ölçüt olabileceği öngörülmüştür.

3.3 Deneyisel Çalışma

Çalışmada hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu oluşumu, yeterli hava boşluğu oluşumu için gerekli katkı miktarı ve hava boşluklarının kararlılıkları üzerindeki etkileri deneyisel olarak araştırılmıştır. Çalışmada kimyasal esasları farklı olan 6 adet hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Katkıların betonlarda oluşturdukları hava boşluk sistemleri, taze halde hava boşluğu analizleri yapan AVA (Air Void Analyzer) cihazıyla belirlenmiştir. AVA sonuçları ışığında katkıların beton performanslarının belirlenmesine yönelik yapılan köpük deneyleri ve yüzey gerilimi yöntemlerinin değerlendirmeleri yapılmıştır. Ayrıca, birçok mühendislik dalında uygulanan cam penetrasyonu deneyi, harçların kıvamlarının ve hava boşluklarının kararlılıklarının değerlendirilmesi amacıyla çalışma kapsamında üretilen harç karışımlarına uygulanmıştır. Sürüklenmiş hava boşluğu boyut dağılımları civalı porozimetre deneyi ile araştırılmıştır. Farklı hava sürükleyici katkıların oluşturdukları boşluklar ve bu boşlukların etrafındaki oluşumlar taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile incelenmiştir.

3.3.1 Kullanılan malzemeler

3.3.1.1 Çimento

Çalışmada, CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal bileşim, %						Fiziksel özellikler	
CaO	62,63	K ₂ O	0,64	SiO ₂	19,59	Özgül ağırlık, g/cm ³	3,15
SO ₃	3,39	Na ₂ O	0,13	Al ₂ O ₃	5,12	Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g	3700
MgO	1,45	MnO	0,10	Fe ₂ O ₃	2,94	Priz başlangıcı, dk	180
Cl ⁻	0,02	SrO	0,12	C ₃ S	51,70	Priz sonu, dk	240
Çözün. kalıntı	0,52	Kızd. kaybı	3,47	C ₃ A	8,60		

3.3.1.2 Agrega

Harç üretimlerinde kullanılan doğal kum ve kırma kum agregalarına ait fiziksel özellikler ve elek analizi sonuçları Çizelge 3.3’te sunulmaktadır. Kırma kumun

63 μ m'luk elekten geçen malzeme miktarı %4,1'dir. Yapılan metilen mavisi deneyi sonucu (TS EN 933-9) metilen mavisi değeri 0,5 mg/g olarak elde edilmiştir.

Çizelge 3.3 : Agregalara ait fiziksel özellikler ve elek analizi sonuçları.

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Elek boyutu, mm - % Geçen							
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	22
Doğal kum	2,62	1,00	11,6	96,7	98,2	98,5	99,0	100	100	100
Kırma kum	2,70	1,25	9,5	19,1	32,6	56,4	99,1	100	100	100

3.3.1.3 Hava sürükleyici katkılar

Çalışmada kimyasal esasları farklı olan 6 farklı hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Hava sürükleyici katkıların kodları ve özellikleri Çizelge 3.4'te FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) analizleri ise Ek B'de verilmektedir.

Çizelge 3.4 : Hava sürükleyici katkıların kodları ve özellikleri.

Kod	Kimyasal esası	Yoğunluk kg/dm ³	pH	Katı madde %	Renk
1	Nötralize vinsol reçinesi	1,004	11,7	12,5	Koyu kahverengi
2	Nötralize kolofon reçinesi	1,020	9,65	7,5	Kahverengi
3	Yağ alkolü ve amonyum tuzu	1,000	9,00	4,5	Açık kahverengi
4	Yağ alkolü türevi	1,008	4,00	5,5	Sarımsı
5	Sodyum tuzları karışımı	1,004	8,20	5,0	Kahverengi
6	Sentetik	1,015	7,00	18,0	Açık kahverengi

3.3.2 Harç karışımı tasarımları

Çalışma kapsamında Bölüm 5'te yapılan deneysel çalışma için tasarlanan betonun harç kısmı üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Harç karışımları hava sürükleyici katkıların farklı miktarlarda kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Katkılar, çimentonun Çizelge 3.5'te verilen yüzdeleri miktarınca kullanılmıştır. Karışım kodlarında ilk değer hava sürükleyici kodunu, ikinci değer katkı miktarı kodunu göstermektedir. Örneğin 3-4, 3 numaralı katkının 4. kullanım miktarını göstermektedir. Katkılar bazı kullanım miktarları arasında veya bir kullanım miktarında belirgin bir etki göstermemiştir. Bu nedenle, her katkı tüm kullanım miktarlarında kullanılmamıştır. Hava sürükleme mekanizmasının karıştırma işlemlerinden etkilenmesi nedeniyle harçlar TS EN 196-1 standardına uygun olarak üretilmiştir.

Çizelge 3.5 : Harçlara ait karışım kodları ve malzeme miktarları.

Kod	Katkı miktarı* %	Çimento g/lt**	Su g/lt**	Doğal kum g/lt	Kırma kum g/lt	Hava Miktarı %
Kontrol	0	357	196	428	477	1,0
1-1	0,00625	357	196	421	470	2,0
1-2	0,0125	357	196	418	466	2,5
1-3	0,025	357	196	415	463	3,0
1-4	0,05	357	196	412	459	3,5
1-6	0,1	357	196	406	452	4,5
1-7	0,125	357	196	399	445	5,5
1-9	0,2	357	196	396	442	6,0
2-1	0,00625	357	196	425	473	1,5
2-3	0,025	357	196	425	473	1,5
2-4	0,05	357	196	415	463	3,0
2-5	0,075	357	196	412	459	3,5
2-6	0,1	357	196	406	452	4,5
2-7	0,125	357	196	403	449	5,0
2-9	0,2	357	196	396	442	6,0
3-1	0,00625	357	196	425	473	1,5
3-2	0,0125	357	196	424	472	1,6
3-3	0,025	357	196	418	466	2,5
3-4	0,05	357	196	412	459	3,5
3-5	0,075	357	196	406	452	4,5
3-6	0,1	357	196	396	442	6,0
4-1	0,00625	357	196	425	473	1,5
4-2	0,0125	357	196	418	466	2,5
4-3	0,025	357	196	415	463	3,0
4-4	0,05	357	196	406	452	4,5
4-6	0,1	357	196	399	445	5,5
5-1	0,00625	357	196	425	473	1,5
5-2	0,0125	357	196	421	470	2,0
5-3	0,025	357	196	418	466	2,5
5-4	0,05	357	196	409	456	4,0
5-6	0,1	357	196	403	449	5,0
6-1	0,00625	357	196	418	466	2,5
6-2	0,0125	357	196	412	459	3,5
6-3	0,025	357	196	406	452	4,5
6-4	0,05	357	196	396	442	6,0
6-6	0,1	357	196	387	431	7,5

* Katkı miktarları, çimento ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.

**Değişen hava hacmine bağlı olarak agrega miktarı değişmekle birlikte, karışımlarda çimento ve su miktarı sabit tutulmuştur.

3.3.3 Deneysel yöntemler

3.3.3.1 Yüzey gerilimi ölçümleri

Yüzey gerilimi ölçümleri ilaç, boya, tarım, tekstil vb. birçok endüstriyel alanda önemli rol almaktadır. Yüzey aktif kimyasal maddeler olan hava sürükleyici katkıların karışım suyunun yüzey gerilimini düşürerek betonlarda hava boşluğu oluşmasını sağladığı bilinmektedir (Bkz. 2.1).

Çalışma kapsamında yüzey gerilimi ölçümlerinin hava sürükleyici katkıların performanslarını değerlendirmede bir ölçüt olması hedeflenmiştir. Bu amaçla çimento ve suyun karıştırılması ile hazırlanan karışımın çökmesinden sonra üste toplanan sıvı (süpernatant) üzerinde yüzey gerilimi ölçümleri yapılmıştır. Yüzey gerilimleri ölçümleri, Du Nouy halkası prensibine göre ölçüm yapan Krüss marka K6 model tensiyometre ile yapılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Yüzey gerilimi ölçümleri.

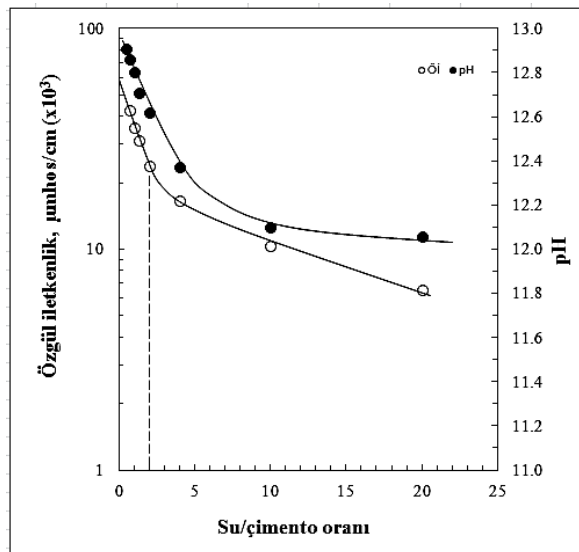
Ölçümlerin yapılacağı karışımın betondaki durumu temsil etmesi gerekmektedir. Ayrıca, su ve çimento karışımlarından süpernatantın olabildiğince kısa sürede ve sorunsuz olarak toplanması deneyin pratikliği ve uygulanabilir olması yönünden önemlidir. Bu etkenler göz önünde tutularak çeşitli su/çimento oranlarında, süpernatant toplanma süresi, pH ve özgül iletkenlik ölçümleri yapılarak yöntem için en uygun su/çimento oranı belirlenmiştir. Ölçümler için 100 ml suya çeşitli oranlarda çimento katılmıştır. Karışımlar manyetik karıştırıcıda çeşitli sürelerde karıştırıldıktan

sonra ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre 5 dakika karışım süresinin yeterli olduğu bu değerden sonra sonuçların değişmediği görülmüştür. Karıştırma işleminden sonra katı kısmın çökmesi için karışım beklemeye alınmıştır. Çökelen karışımdan süpernatant damlalıklarla alınmış ve bir kaptan toplanmıştır. Toplanan süpernatant üzerinde pH ve özgül iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Özgül iletkenlik değerleri zeta potansiyeli ölçümlerinde yapılabildiği zeta meter (3.0 model) cihazında yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.6 ve Şekil 3.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.6 : Yüzey gerilimi yönteminde su/çimento oranının belirlenmesi.

Su/çimento oranı	Süpernatant toplama süresi (dakika)	pH	Özgül iletkenlik ($\mu\text{mhos/cm}$)
20	1	12,06	6510
10	1	12,10	10360
4,0	3	12,37	16700
2,0	5	12,62	23800
1,3	45	12,71	31000
1,0	60	12,80	35600
0,67	150	12,86	42400
0,5	-	12,90	-

Su/çimento oranı 1,3 ve daha düşük olan karışımlardan ancak pH ve özgül iletkenlik ölçümleri yapılabilecek kadar süpernatant toplanabilmiştir. Su/çimento oranı 0,5 olan karışımda süpernatant toplama süresi belirlenememiş ve yeterli sıvı toplanamadığından özgül iletkenlik ölçümü yapılmamıştır. Bu oranda pH ölçümü ise karıştırma sırasında yapılmıştır.



Şekil 3.2 : S/Ç oranına bağlı olarak özgül iletkenlik ve pH değişimleri.

Yapılan ölçümler sonucundan, yüzey gerilimi ölçümleri için kullanılacak karışımın su/çimento oranı 2 olarak belirlenmiştir. Bu oranda, süpernatant hem kısa sürede elde edilebilir hem de betondaki durumu temsil edebilir.

Yüzey gerilimi ölçümleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

i. Süpernatantın hazırlanması

- Karışım (su/çimento=2) manyetik karıştırıcıda uygun hızda 5 dakika karıştırılır.
- Karışım, çimentonun çökmesi için beklemeye bırakılır. 5 dakika bekleme süresi yeterli olabilir.
- Karışımından süpernatant damlalıkla alınarak bir kaptan toplanır.
- 100 g su ve 50 g çimento ile hazırlanan karışımdan 5 dakika bekleme süresi sonunda, 50 ml süpernatant toplanabilir.

ii. Deney

- 50 ml süpernatant manyetik karıştırıcıda karıştırılır bu esnada kimyasal katkıları karışıma miktarınca eklenir.
- Süpernatant 5 dakika karıştırıldıktan sonra deney için 30 ml alınır.
- Deney kabına konan 30 ml süpernatant üzerinde yüzey gerilimi ölçümleri yapılır.

3.3.3.2 Köpük indeksi (Foam Index) deneyi

Bu yöntem son derece basit ve kısa sürede değerlendirme olanağı sağlayan bir yöntemdir. Deney sonucunda betonda yeterli miktarda ve kararlı hava boşlukları oluşması için kullanılması gereken katkı miktarına görsel olarak karar verilir. Köpük indeksi yöntemi aşağıda özetlenmektedir.

- 50 ml su ve 20 g çimento bir kaba konularak 15 saniye boyunca çalkalanır.
- 45 saniye içinde hava sürükleyici katkı eklenir ve karışım 15 saniye daha çalkalanır. Daha sonra kapak açılarak değerlendirme yapılır (Şekil 3.3).

Yüzeyin kabarcıklarla kaplandığı ve 45 saniye boyunca kabarcıkların bozulmadığı durumdaki katkının seyreltilmemiş hacminin bağlayıcı ağırlığına oranı köpük indeksi değeri olup birimi $\mu\text{l/g}$ veya ml/kg olarak kullanılabilir. Hava kabarcıkları yüzeyi tamamen kaplamamışsa (Şekil 3.4'te soldaki gibi) hava sürükleyici katkı miktarı artırılarak işlemler tekrarlanır.



Şekil 3.3 : Köpük indeksi deneyi değerlendirmesi (Grace, TB02-02).

3.3.3.3 Köpük drenajı (Foam Drainage) deneyi

Köpük drenajı yöntemi ile hava sürükleyici katkıların kararlılıkları, sıvı kısmın köpükten zamana bağlı olarak drene olmasıyla değerlendirilmektedir. Köpük drenajı yöntemi aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Sırasıyla 300 ml su, 10 ml katkı ve 5 g çimento mutfak tipi karıştırıcıya (blender) konularak iki dakika karıştırılır.

Karışım 6 mm çaplı ve 1000 ml ölçekli mezüre boşaltılır.

Zamana bağlı olarak köpük/sıvı ara yüzeyinin seviyesi kaydedilir.

Hesaplamalar Denklem 3.1 ve 3.2'ye göre yapılır.

$$V_d = V_0 - 1/(k.t) \quad (3.1)$$

V_d = t anında drene edilen sıvı miktarı,

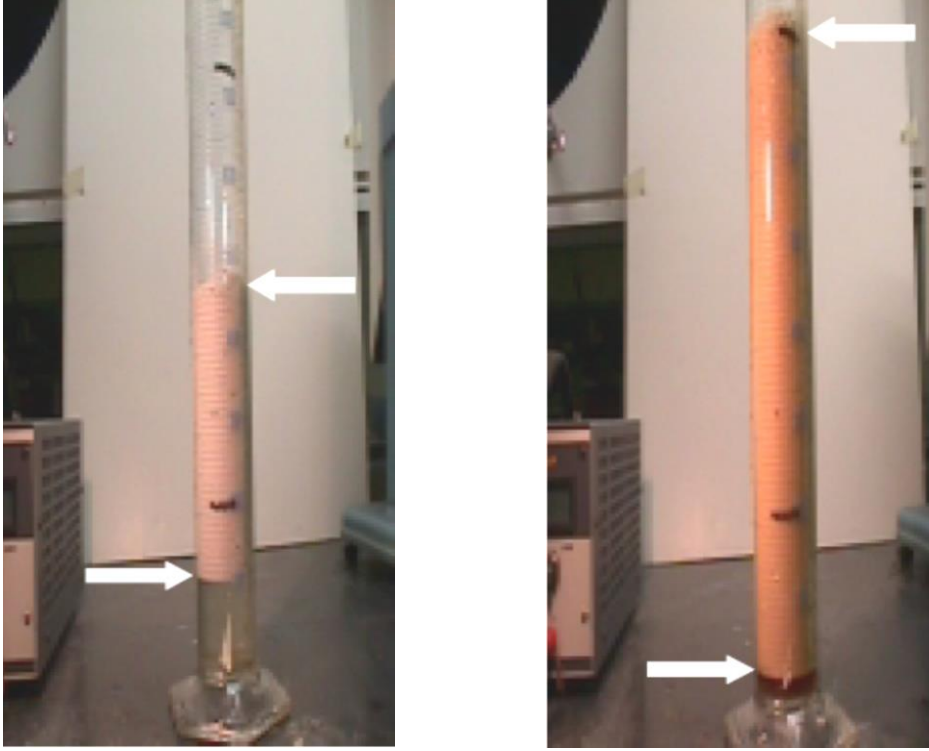
V_0 = deney başladığında köpükteki sıvı miktarı,

$-1/k$ = drenaj hızı

V_0 ve k değerleri, V_d-1/t grafiğinden hesaplanır. Bu grafiğin eğimi $-1/k$ ve eksenini kestiği nokta V_0 olarak belirlenir. Ayrıca, korelasyon katsayısı (r)'da hesaplanır.

$$\text{Drenaj yüzdesi} = (310 - V_0) \times 100 / 310 \quad (3.2)$$

Denklemdaki 310 başlangıç sıvı seviyesini göstermektedir. Deneyde ayrıca köpük yüksekliği de zamana bağlı olarak kaydedilir. Şekil 3.4'te iki farklı katkının köpük drenajı deneyi başlangıcına ait karşılaştırılmaları gösterilmektedir. Soldaki oklar sıvı seviyesini sağdaki oklar ise köpük yüksekliğini göstermektedir.

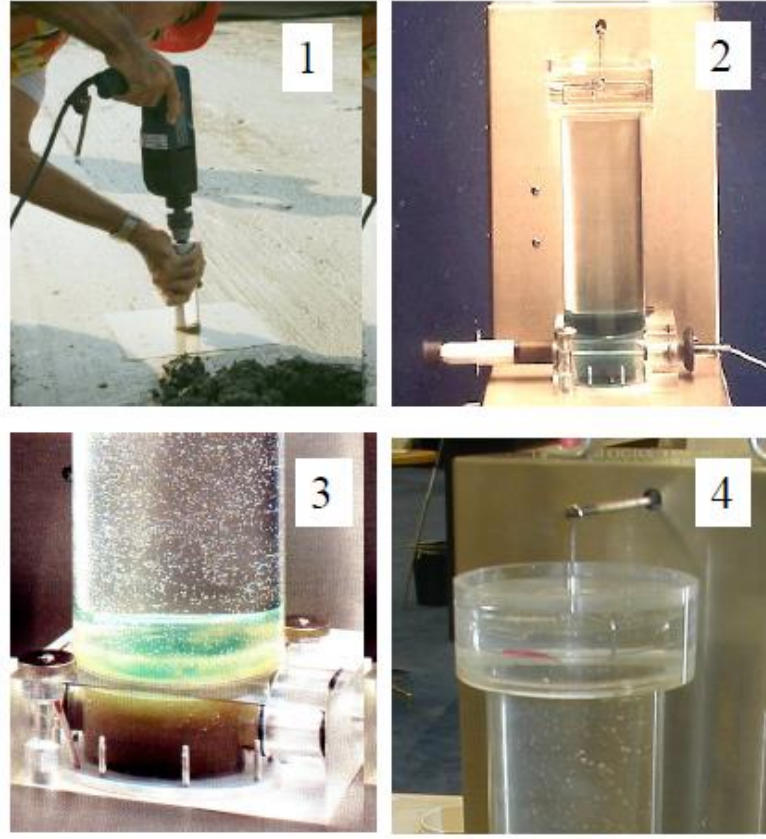


Şekil 3.4 : Köpük drenajı deneyi (Cross ve diğ., 2000).

3.3.3.4 AVA (Air void analyzer) ile hava boşluğu sistemi analizleri

AVA cihazı taze betonlarda hava boşluk sistemi analizlerinde kullanılmaktadır. Analiz sonuçları, sertleşmiş beton sonuçları ile yüksek korelasyon vermektedir (Magura, 1996). Analizler taze betonlardan alınan 20 ml'lik örnekler üzerinde yapılmaktadır. Bu nedenle AVA cihazı ile taze betonun hava miktarını tam olarak belirlenememektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar betonların hava miktarları ile uyumludur. Diğer hava boşluğu sistemi parametreleri olan aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri ise taze ve sertleşmiş halde elde edilen değerlere çok yakın olarak elde edilmektedir.

Numune alınması ve ölçümlere ait şekiller Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : Taze betonda hava boşluğu sistemi ölçümleri (Petersen, 2009).

1. Taze betondan örnek alınması. Kullanılan matkabın ucunda göz aralıkları 6 mm olan bir kafes bulunmaktadır. Kafes içine dolan betondan şırınga ile 20 ml'lik örnek alınır. Bu çalışmada ise örnekler şırınga ile doğrudan alınmıştır.
2. Alınan örnekler ölçümün yapılacağı sisteme şırınga ile enjekte edilir. Ölçümlerin yapılacağı plastik boru şartlandırılmış su ve viskozitesi ayarlanmış sudan daha yoğun olan deney sıvısı ile doludur.
3. Enjekte edilen beton, boru tabanında bulunan manyetik karıştırıcı ile 30 saniye süreyle karıştırılır. Karıştırma işlemi esnasında beton içinde bulunan hava kabarcıkları betonu terk eder ve plastik boruda yükselir. Karışımı terk eden hava kabarcıklarının deformasyona uğramaması için deney sıvısı kullanılmaktadır.
4. Hava kabarcıkları boru boyunca Stoke yasasına göre yükselirler. Yükselen hava kabarcıkları borunun tavanında asılı olan terazide suyun yerini alarak ağırlık azalmasına sebep olurlar. Hava boşluğu sistemi analizleri belirli zaman aralıklarında terazideki ağırlık ölçümleri kullanılarak bir bilgisayar yazılımı ile yapılmaktadır. Analizler sonucunda hava boşluğu sistemi parametreleri olan hava miktarı, aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri belirlenmektedir.

3.3.3.5 Cam penetrasyonu deneyi

Cam penetrasyonu deneyi birçok mühendislik dalında viskozite, çökelme vb. değerleri ölçmede bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, hava sürüklenmiş harçların kıvamları ve hava boşluklarının zaman içinde kararlılıklarını ölçmek amacıyla uygulanmıştır. İç çapı 6 cm olan cam kavanoz içine 7,5 cm yüksekliğe kadar harç doldurulmuş ve sabit yükseklikten belirli zaman aralıklarında, çapı 7,3 mm ve ağırlığı 25,6 g olan bir cam çubuk serbest düşüşe bırakılarak çubuğun harca batma derinlikleri ölçülmüştür. Ölçümler belirli zaman aralıklarında tekrarlanmıştır. Buharlaştırmanın engellenmesi amacıyla deney anına kadar kabın kapağı kapalı tutulmuştur. Cam penetrasyonu deneyi düzeneği Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Cam penetrasyonu deney düzeneği.

3.3.3.6 Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, $7 \times 7 \times 7$ cm³'lük numunelerden taş kesme cihazında kesilerek alınan ve bir kenar uzunluğu 4 cm olan küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler, $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de kirece doymun suda kür edildikten sonra, 28. günde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyler 3000 kN kapasiteli yükleme cihazında 0,5 kN/s yükleme hızında gerçekleştirilmiştir.

3.3.3.7 Civalı porozimetre deneyi

Civalı porozimetre deneyleri (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP), 28 gün %100 bağıl nemli ortamda kürlenmiş numunelerden kesilerek alınan örnekler üzerinde yapılmıştır. Numuneler, 21 gün 20 ± 2 °C ve % 65 ± 5 bağıl neme sahip odada saklanarak boşlukları içindeki suların buharlaşması ve deneye hazır duruma getirilmesi sağlanmıştır. Kuruma periyodundan sonra numuneler deney gününe kadar desikatörde tutulmuştur. Deneyler, 60.000 Psi ($\approx 413,7$ MPa) basınç uygulayabilen Quantachrome marka PoreMaster® model cihazda gerçekleştirilmiştir. Civanın, küçük çaplı boşluklara daha yüksek basınçta penetre olacağı kabulüyle boşluk boyut dağılımları elde edilmektedir.

3.3.3.8 Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri harç numunelerden alınan kesitler üzerinde yapılmıştır. Numune yüzeyleri ince uçlu taş kesme makinasında düzeltildikten sonra incelenecek yüzey vakum altında altın kaplanarak hazırlanmıştır. Görüntüler, Jeol JSM-5410 model taramalı elektron mikroskobunda alınmıştır.

3.3.4 Deney sonuçları

Çalışmada, hava sürükleyici katkıların performanslarının belirlenmesine yönelik olarak yüzey gerilimi ölçümleri, köpük indeksi ve köpük drenajı deneyleri yapılmıştır. Farklı hava miktarlarına sahip harçlar üzerinde hava boşluğu sistemi analizleri yapılarak farklı kimyasal esasa sahip hava sürükleyici katkıların oluşturdukları boşluk sistemleri araştırılmış ve analiz sonuçlarına göre katkıların beton performansları değerlendirilmiştir. Harçların kıvamlarını ve hava boşluklarının kararlılıklarını belirlemek amacıyla cam penetrasyonu deneyi yapılmıştır. Ayrıca, hava boşluğu boyut dağılımları da civalı porozimetre deneyi ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ise deney sonuçlarının değerlendirilmesi bölümünde sunulmaktadır.

3.3.4.1 Yüzey gerilimi deneyi

Yüzey gerilimi deneyleri 3.3.3.1’de anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Altı farklı hava sürükleyicinin farklı miktarlarda kullanımıyla yapılan yüzey gerilimi deneylerine ait sonuçlar Çizelge 3.7’de verilmektedir.

Çizelge 3.7 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.

Kod	Katkı miktarı* %	Yüzey gerilimi mN/m	Bağlı yüzey gerilimi	Kod	Katkı miktarı* %	Yüzey gerilimi mN/m	Bağlı yüzey gerilimi
Kontrol	0	66,0	100	3-4	0,05	43,5	65,9
1-1	0,00625	66,0	100	3-5	0,075	37,5	56,8
1-2	0,0125	65,0	98,5	3-6	0,1	36,0	54,5
1-3	0,025	63,0	95,5	4-1	0,00625	59,0	89,4
1-4	0,05	60,0	90,9	4-2	0,0125	52,0	78,8
1-6	0,1	55,0	83,3	4-3	0,025	45,0	68,2
1-7	0,125	54,0	81,8	4-4	0,05	39,0	59,1
1-9	0,2	50,0	75,8	4-6	0,1	35,5	53,8
2-1	0,00625	63,0	95,5	5-1	0,00625	64,5	97,7
2-3	0,025	60,0	90,9	5-2	0,0125	57,0	86,4
2-4	0,05	56,0	84,8	5-3	0,025	53,5	81,1
2-5	0,075	54,5	82,6	5-4	0,05	45,0	68,2
2-6	0,1	53,0	80,3	5-6	0,1	38,0	57,6
2-7	0,125	51,5	78,0	6-1	0,00625	55,0	83,3
2-9	0,2	51,0	77,3	6-2	0,0125	44,0	66,7
3-1	0,00625	58,0	87,9	6-3	0,025	41,0	62,1
3-2	0,0125	54,0	81,8	6-4	0,05	35,0	53,0
3-3	0,025	47,5	72,0	6-6	0,1	35,0	53,0

* Katkı miktarları, çimento ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.

3.3.4.2 Köpük indeksi deneyi

Köpük indeksi deneyleri 3.3.3.2’de açıklanan yöntemle uygun yapılmıştır. Deney sonucunda kap yüzeyinin tamamen hava boşlukları ile kaplanmasını sağlayan hava sürükleyici katkı miktarı belirlenmiştir. Deneylerde yüzey gerilimi ölçümlerin yapıldığı katkı miktarlarında denemeler yapılmıştır. Kimyasal katkılar 1:50 (1 katkı 50 deiyonize su) oranında seyreltilerek kullanılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3.8’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.8 : Köpük indeksi deney sonuçları.

Katkı kodu	Yüzeyin kaplandığı durumdaki katkı miktarı %	Köpük indeksi ml/kg	Bağlı köpük indeksi
1	0,025	0,44	400
2	0,025	0,44	400
3	0,0125	0,22	200
4	0,0125	0,22	200
5	0,0125	0,22	200
6	0,00625	0,11	100

Köpük indeksi değeri ne kadar küçükse çimento ile katkı uyumu o kadar yüksektir (Corr ve diğ., 2002). Sonuçlardan, sentetik esaslı 6 numaralı katkı ile aynı performansı elde edebilmek için diğer katkılardan daha fazla miktarda kullanılması gerektiği görülmektedir.

3.3.4.3 Köpük drenajı deneyi

Köpük drenajı deneyi 3.3.3.3'te açıklanan yöntemeye uygun olarak yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3.9'da sunulmaktadır.

Çizelge 3.9 : Köpük drenajı deney sonuçları.

Katkı no	Süre (dakika) / Sıvı seviyesi (ml)												
	30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
1	35	50	80	115	150	180	198	220	230	230	255	260	265
2	50	85	135	170	200	215	225	235	240	250	260	270	280
3	10	20	50	85	150	200	235	270	285	290	295	296	298
4	20	60	90	150	208	235	255	285	298	298	306	308	310
5	15	45	65	100	170	225	250	285	298	298	304	306	308
6	30	55	100	150	210	240	260	284	290	290	298	300	300

Köpük drenajı deney sonuçları kullanılarak hesaplanan V_0 , $-1/k$, % drenaj ve korelasyon katsayısı (r) değerleri Çizelge 3.10'da sunulmaktadır. Hesaplamalarda 1-60 dakika arasındaki veriler kullanılmıştır.

Çizelge 3.10 : Köpük drenajı deneyi parametreleri.

Katkı no	V_0	$-1/k$	r	% drenaj
1	227	217	-0,91	27
2	249	183	-0,96	20
3	268	313	-0,89	13,5
4	288	278	-0,93	7
5	280	301	-0,89	10
6	286	273	-0,94	12

Literatürde, V_0 değeri yükseldikçe ve $-1/k$ değeri düştükçe daha az kararlı köpük oluştuğu belirtilmektedir (Taylor ve diğ., 2006). Buna dayanarak, reçine esaslı 1 ve 2 nolu katkıların daha düşük V_0 değerine sahip olmalarından dolayı daha kararlı hava boşluğu sistemi oluşturabilecekleri söylenebilir.

3.3.4.4 Hava boşluğu sistemi analizleri

Hava boşluğu sistemi analizleri AVA cihazı kullanılarak 3.3.3.4'te anlatılan yöntem uygulanarak yapılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 3.11'de verilmektedir.

Çizelge 3.11 : Harçların hava boşluğu sistemi analizleri.

Kod	Katkı miktarı* %	Tasarım hava miktarı %	< 2mm			< 1mm			<0,35 mm
			Hava miktarı %	Aralık faktörü mm	Özgül yüzey mm ² /mm ³	Hava miktarı %	Aralık faktörü mm	Özgül yüzey mm ² /mm ³	
Kontrol	0	1,0	1,2	1,521	6,2	0,8	1,440	7,8	0,2
1-1	0,00625	2,0	1,6	0,979	8,7	1,1	0,930	10,6	0,3
1-2	0,0125	2,5	2,2	0,955	7,7	1,5	0,931	9,5	0,4
1-3	0,025	3,0	2,4	0,748	9,4	1,8	0,713	11,2	0,6
1-4	0,05	3,5	3,2	0,366	17,1	2,7	0,347	19,3	1,5
1-6	0,1	4,5	5,0	0,245	19,7	4,8	0,229	22,8	3,0
1-7	0,125	5,5	4,9	0,250	20,4	4,6	0,247	21,4	3,2
1-9	0,2	6,0	5,9	0,186	25,5	5,5	0,181	26,9	4,1
2-1	0,00625	1,5	1,7	1,339	6,2	1,2	1,366	7,1	0,3
2-3	0,025	1,5	1,5	0,980	8,9	1,2	0,951	10,2	0,4
2-4	0,05	3,0	3,0	0,554	11,0	2,6	0,524	13,0	1,0
2-5	0,075	3,5	3,4	0,336	18,0	3,0	0,319	20,2	1,8
2-6	0,1	4,5	4,3	0,264	19,0	4,0	0,253	20,8	2,6
2-7	0,125	5,0	5,2	0,249	22,4	4,7	0,240	23,2	3,0
2-9	0,2	6,0	5,9	0,210	22,6	5,5	0,205	23,9	3,9
3-1	0,00625	1,5	1,4	0,997	9,0	1,1	0,965	10,2	0,4
3-2	0,0125	1,6	1,8	0,760	10,6	1,4	0,722	12,4	0,5
3-3	0,025	2,5	2,1	0,419	18,8	1,7	0,405	20,3	1,0
3-4	0,05	3,5	3,5	0,225	25,0	3,4	0,221	26,0	2,0
3-5	0,075	4,5	4,3	0,200	28,6	4,2	0,195	30,0	3,0
3-6	0,1	6,0	5,9	0,175	29,9	5,8	0,173	30,5	4,1
4-1	0,00625	1,5	1,7	1,018	7,5	1,4	0,987	9,1	0,4
4-2	0,0125	2,5	2,6	0,678	10,1	2,0	0,638	12,2	0,7
4-3	0,025	3,0	3,0	0,391	19,1	2,9	0,379	20,8	2,2
4-4	0,05	4,5	4,4	0,182	29,1	4,2	0,179	29,9	3,6
4-6	0,1	5,5	5,5	0,175	29,9	4,9	0,173	30,9	4,2
5-1	0,00625	1,5	1,5	1,067	8,3	1,1	1,035	9,7	0,3
5-2	0,0125	2,0	1,8	0,765	10,5	1,5	0,739	11,9	0,6
5-3	0,025	2,5	2,7	0,433	15,5	2,4	0,417	17,0	1,3
5-4	0,05	4,0	4,0	0,236	23,8	3,8	0,230	25,2	2,8
5-6	0,1	5,0	5,1	0,210	27,5	4,6	0,206	29,0	3,8
6-1	0,00625	2,5	2,3	0,455	14,9	2,2	0,429	17,2	1,1
6-2	0,0125	3,5	3,5	0,267	23,5	3,0	0,262	24,6	2,2
6-3	0,025	4,5	4,5	0,195	29,2	3,8	0,192	30,1	3,2
6-4	0,05	6,0	6,0	0,145	31,6	6,2	0,143	32,5	5,5
6-6	0,1	7,5	7,9	0,110	35,6	7,7	0,110	36,4	7,2

* Katkı miktarları, çimento ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.

3.3.4.5 Cam penetrasyonu deneyi

Cam penetrasyonu deneyleri 3.3.3.5'te anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri ise 7x7x7 cm³ boyutunda alınan harç numuneler üzerinde ağırlığın hacme bölünmesiyle hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.12'de verilmektedir.

Çizelge 3.12 : Cam penetrasyonu deneyi sonuçları.

Kod	Yoğunluk g/cm ³	Penetrasyon derinliği, mm				
		0'	15'	30'	60'	90'
Kontrol	2,212	10	17	26	31	15
1-1	2,191	65	45	40	46	47
1-2	2,178	30	32	38	30	25
1-3	2,166	30	30	35	17	16
1-4	2,133	30	30	33	25	15
1-6	2,043	40	40	33	25	15
1-7	2,030	42	40	35	30	30
1-9	1,951	45	47	45	42	40
2-1	2,184	75	60	55	50	40
2-3	2,142	30	40	35	35	20
2-4	2,088	41	36	40	36	23
2-5	2,050	30	35	47	45	45
2-6	2,001	40	48	50	40	40
2-7	1,955	50	33	47	50	55
2-9	1,937	40	35	50	47	33
3-1	2,188	30	35	39	38	30
3-2	2,169	35	35	35	36	31
3-3	2,155	45	50	50	43	45
3-4	2,092	50	65	45	48	40
3-5	2,072	60	65	65	55	50
3-6	1,950	65	60	55	50	40
4-1	2,207	75	73	46	55	45
4-2	2,192	35	35	35	36	31
4-3	2,160	32	39	38	35	39
4-4	2,104	45	47	50	43	45
4-6	2,058	40	36	35	45	50
5-1	2,208	60	48	60	65	50
5-2	2,238	35	35	35	40	22
5-3	2,168	47	42	46	38	25
5-4	2,101	50	45	47	38	20
5-6	2,032	45	43	45	40	38
6-1	2,164	72	56	57	53	45
6-2	2,103	40	35	30	30	25
6-3	2,066	45	40	35	40	30
6-4	1,948	47	53	53	45	40
6-6	1,867	55	53	50	40	37

3.3.4.6 Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyleri 3.3.3.6’da anlatılan yöntemle uygun hazırlanan numuneler üzerinde ve belirtilen yükleme cihazında yapılmıştır. Basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 3.13’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.13 : Basınç dayanımı deney sonuçları.

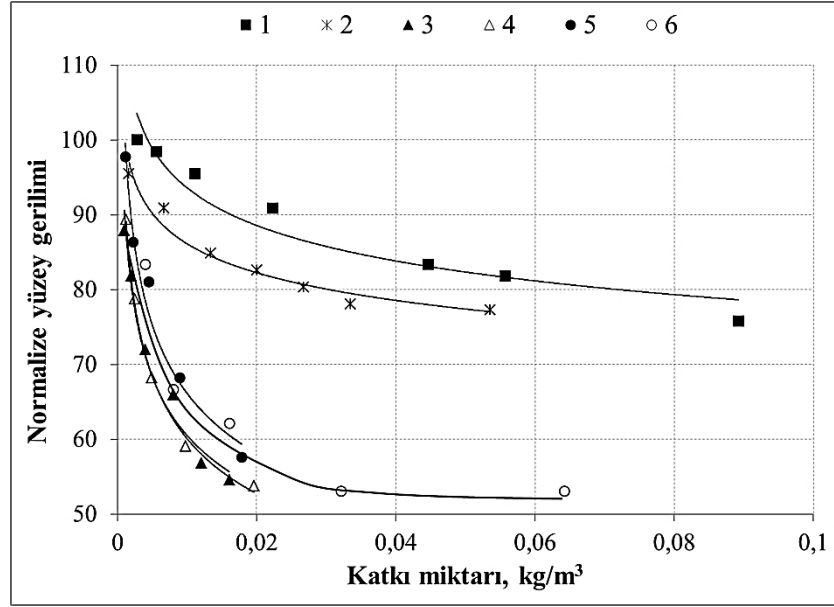
Kod	Basınç Day., MPa	Kod	Basınç Day., MPa
Kontrol	49,0	3-4	42,5
1-1	47,8	3-5	35,0
1-2	42,4	3-6	28,0
1-3	41,8	4-1	51,7
1-4	35,5	4-2	46,4
1-6	31,8	4-3	40,0
1-7	32,0	4-4	35,4
1-9	27,0	4-6	32,0
2-1	48,8	5-1	46,0
2-3	48,2	5-2	43,4
2-4	46,2	5-3	38,0
2-5	41,5	5-4	35,2
2-6	40,6	5-6	27,3
2-7	34,1	6-1	45,2
2-9	31,5	6-2	38,0
3-1	49,2	6-3	32,2
3-2	48,5	6-4	28,6
3-3	45,3	6-6	24,5

3.3.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümde yüzey gerilimi ile katkı miktarı ve hava boşluğu sistemi parametreleri arasındaki ilişkisi, hava boşluklarının boyut dağılımları ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasının harçların basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, köpük indeksi deneyi sonuçları yüzey gerilimleri sonuçları ile ve köpük drenajı deneyi sonuçları cam penetrasyonu sonuçları ile beraber ele alınarak değerlendirilmişlerdir.

3.3.5.1 Yüzey gerilimi katkı miktarı ilişkisi

Hava sürükleyici katkıların kullanım miktarlarına (katı madde miktarları dikkate alınmıştır) göre yüzey gerilimi üzerindeki etkileri Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi.

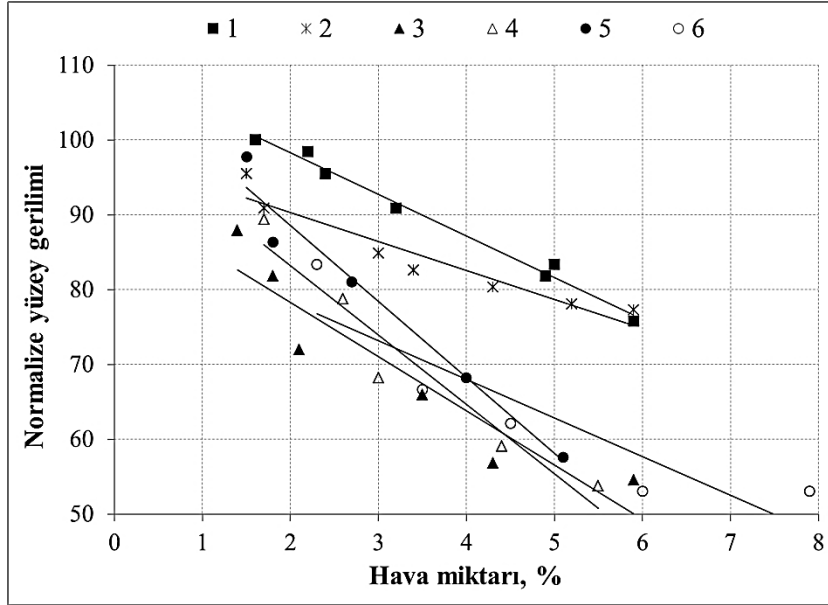
Kullanılan katkı miktarı arttıkça karışımların yüzey gerilimi düşmüştür. Reçine esaslı katkılar (1 ve 2) ise yüzey gerilimini diğer katkıların kıyasla daha az düşürmüştür. Yağ alkolü esaslı katkılar (3 ve 4), diğer katkıların kıyasla daha düşük katkı miktarlarında yüzey gerilimini düşürmüştür. Kullanılan tüm katkılarda belli bir miktardan sonra katkı miktarının artırılması yüzey gerilimi üzerinde etki etmemiştir. Yüzey gerilimi değerlerinin katkı miktarının artırılmasına karşın değişmediği bu nokta “kritik misel konsantrasyonu (critical micelle concentration, CMC¹)” olarak adlandırılmaktadır.

Pedersen ve diğ. (2007) çalışmalarında köpük indeksi deneyi yerine kullanılacak yeni bir yöntem olarak yüzey gerilimi ölçümlerini önermişlerdir. Çalışmalarında sadece yüzey gerilimi ölçümleri ile köpük indeksi ölçümlerinin korelasyonunu incelemişlerdir. Ayrıca, yüzey gerilimi ölçümlerini rastgele çimento ve su miktarlarında yapmışlardır. Bu çalışmada ise yüzey gerilimi ölçümlerinin yapılacağı su ve çimento oranı için ölçümler yapılmış ve en uygun oran belirlenmiştir. Karıştırma işlemleri operatöre bağlı olmayıp denemeler sonucu süre optimize edilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışma kapsamında boşluk sistemi analizleri yapılmış ve yüzey gerilimi ölçüm sonuçlarının hava boşluğu sistemi parametreleri üzerine etkisi de incelenmiştir.

¹ Bu terim ile ilgili geniş bilgiye Myers (2006)’dan erişilebilir.

3.3.5.2 Yüzey gerilimi hava boşluğu sistemi parametreleri ilişkisi

Hava sürükleyici katkıların farklı miktarlarda kullanılmasıyla üretilen harçlar üzerinde yapılan hava boşluğu sistemi analizleri 3.3.4.4'te verilmektedir. Yüzey geriliminin hava miktarı ile değişimi Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

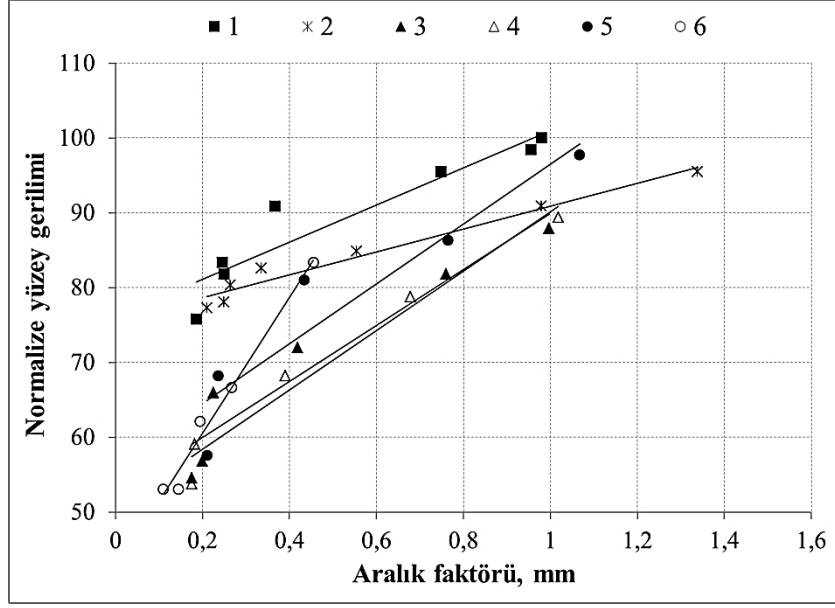


Şekil 3.8 : Normalize yüzey geriliminin hava miktarı ile değişimi.

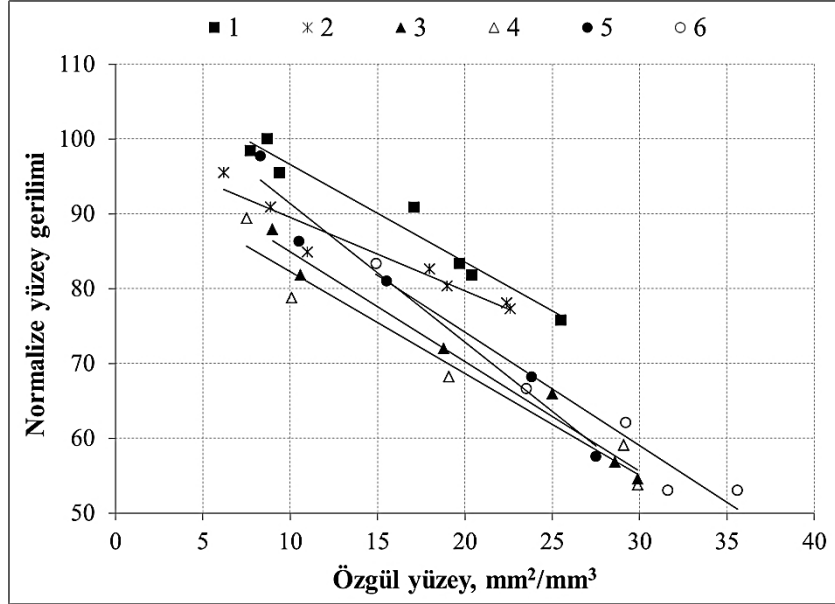
Yüzey gerilimi ile hava miktarı arasında ters orantılı bir ilişki elde edilmiştir. Yüzey gerilimi değerlerinin düşmesiyle hava miktarları artmıştır. Bununla birlikte, yüzey gerilimi değerleri kritik misel konsantrasyonu noktasına ulaştıktan sonra katkı miktarının arttırılmasıyla değişmemesine karşın hava miktarları artmaya devam etmiştir.

Reçine esaslı katkıları (1 ve 2), yüzey gerilimi değerini diğer katkıları kadar düşürmemelerine rağmen bu katkılarıyla yeterli hava miktarları elde edilmiştir. Literatürde genel olarak bazı katkıların yüzey gerilimi üzerinde etkili olduğu bazıları ise yüzey gerilimi değerlerini etkilemediği belirtilmektedir. Katkı miktarına göre yüzey gerilimi ve hava miktarı değişimini inceleyen bir çalışmaya ise rastlanılmamıştır.

Yüzey gerilimi ile aralık faktörü ve özgül yüzey değerlerinin ilişkileri sırasıyla Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.9 : Normalized yüzey gerilimi ile aralık faktörü ilişkisi.

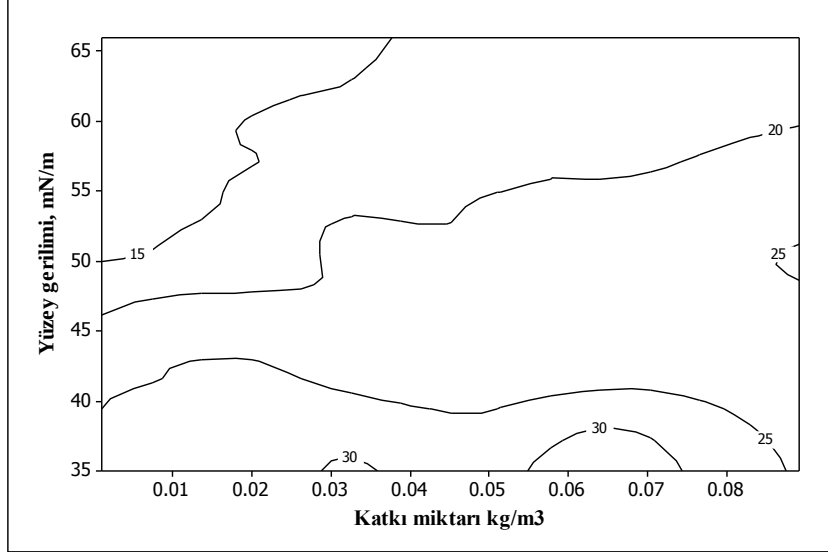


Şekil 3.10 : Normalized yüzey gerilimi ile özgül yüzey ilişkisi.

Reçine esaslı katkılar (1 ve 2) yüzey gerilimini diğer katkılara kıyasla fazla düşürmemelerine rağmen, diğer katkılarla beraber yeterli aralık faktörüne sahip hava boşluğu sistemi oluşturmuşlardır. Sentetik esaslı olan 6 numaralı katkı aralık faktörü değeri üzerinde diğer katkılara kıyasla daha etkin olmuştur. Aralık faktörü üzerindeki bu etkinliğinin içerdiği yüksek katı madde miktarından kaynaklandığı düşünülebilir.

Kullanılan tüm katkılarla yeterli özgül yüzey değerleri elde edilmiştir. Yüzey gerilimini diğer katkılara kıyasla daha az düşüren reçine esaslı katkıları (1 ve 2) kullanılarak oluşturulan hava boşluğu sistemlerinin özgül yüzey değerleri diğer

katkılarının kine kıyasla daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak, bu katkıların yüzey gerilimini fazla düşürmemeleri veya Bölüm 2.1’de de bahsedilen farklı bir mekanizma ile hava boşluğu oluşturmaları düşünülebilir. Yüzey gerilimi ve katkı miktarına göre özgül yüzey değerleri Şekil 3.11’de gösterilmektedir.

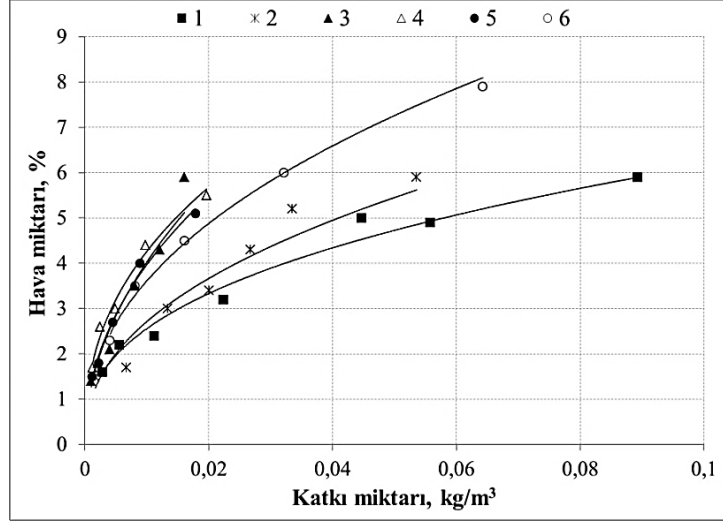


Şekil 3.11 : Yüzey gerilimi ve katkı miktarına göre özgül yüzey değerleri.

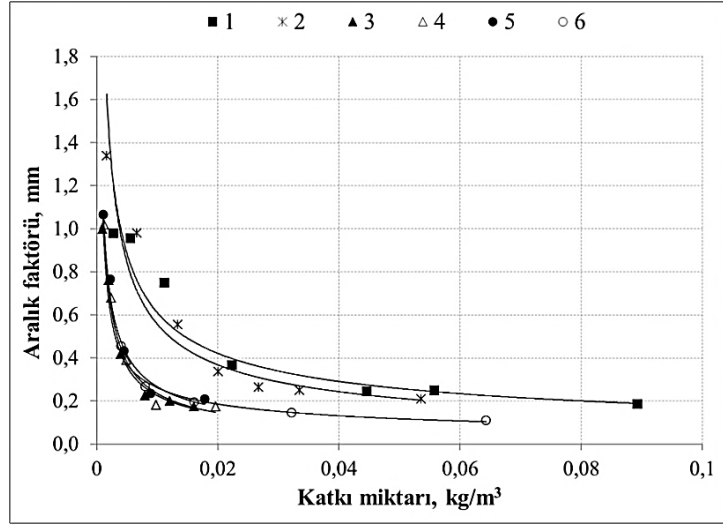
Hava sürükleyici katkıların karışım suyunun yüzey gerilimini düşürerek daha küçük çaplı boşluk oluşturdıkları bilinmektedir (Bkz. 2.1). Yüzey gerilimi değerini belli bir değerin altına düşüremeyen katkı ve kullanım miktarlarında 25 mm²/mm³'ten daha fazla özgül yüzeye sahip hava boşluğu sistemi elde edilememiştir.

3.3.5.3 Katkı miktarı hava boşluğu sistemi parametreleri ilişkisi

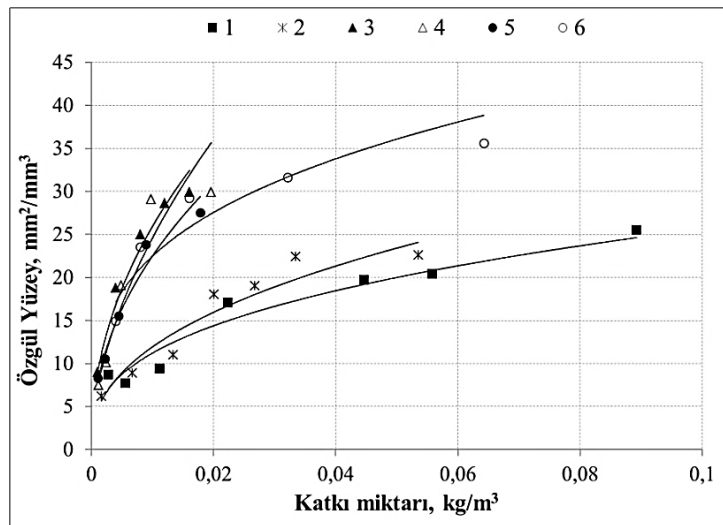
Hava sürükleyici katkıların kullanım miktarlarının (katı madde miktarları dikkate alınmıştır) hava boşluğu sistemi parametreleri üzerinde etkileri incelenerek, katkıların etkinlikleri araştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 3.12’de verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.12 : Hava boşluğu sistemi parametrelerinin katkı miktarı ile değişimleri.

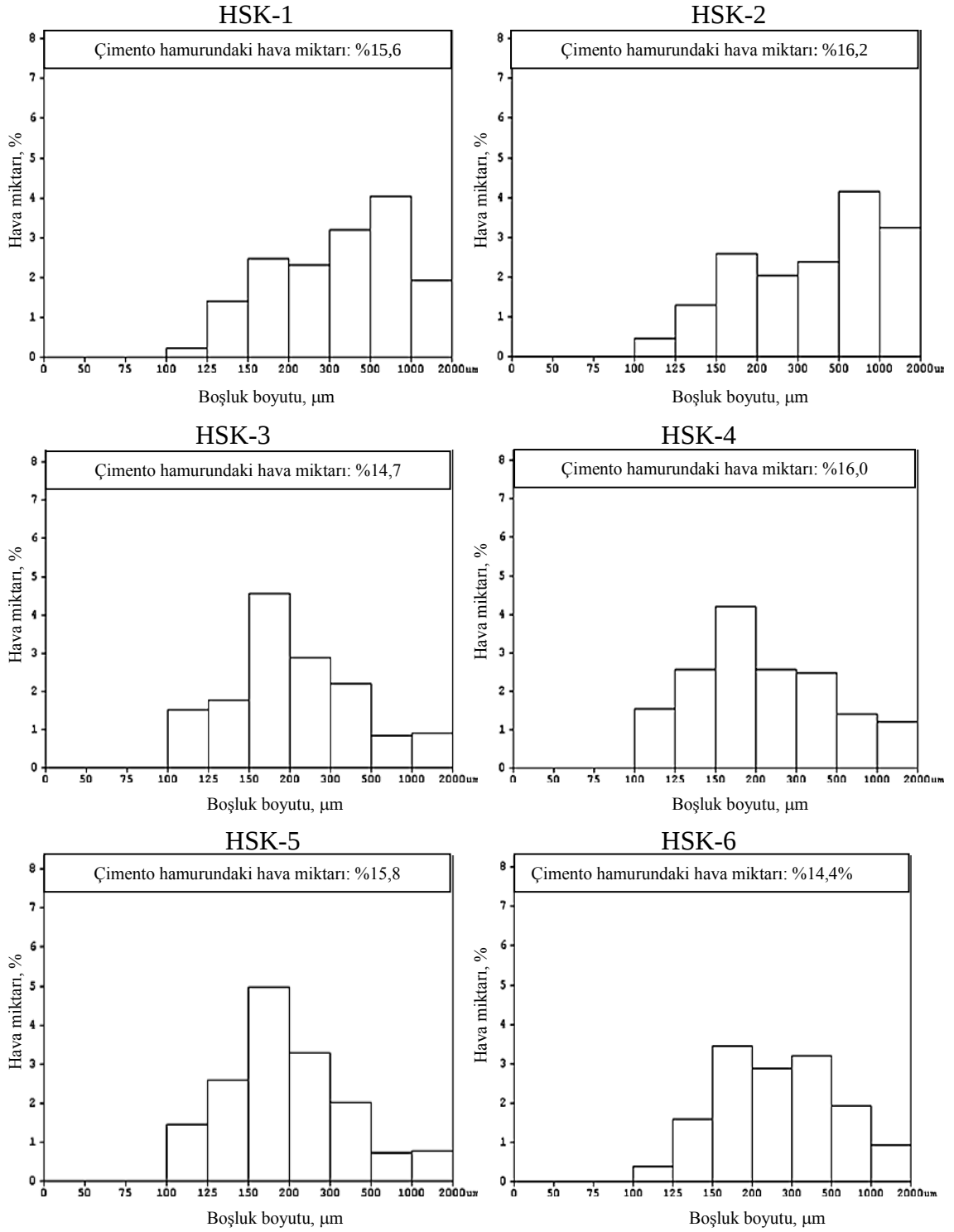
Kullanılan tüm katkılarla yeterli hava boşluğu sistemi elde edilmiştir. Bununla birlikte, aynı hava boşluğu sistemi parametrelerini elde etmek için reçine esaslı katkılardan (1 ve 2) daha fazla miktarda kullanılması gerektiği görülmüştür. Bu sonuç köpük indeksi sonuçları ile uyumludur. Yüzey gerilimi katkı miktarı ilişkisinin incelendiği grafikte (Şekil 3.7), kullanılan tüm katkılarda belli bir miktardan sonra katkı miktarının arttırılmasının yüzey gerilimi üzerinde etkili olmadığı görülmüştü. Hava boşluğu sistemi analizleri sonucunda ise katkı miktarındaki artışın hava boşluğu sistemi parametrelerini etkilemeye devam ettiği görülmüştür.

Sonuç olarak katkı miktarının arttırılmasıyla yüzey gerilimi değişmese bile, hava miktarı ve özgül yüzey değerleri artmaya, aralık faktörü ise azalmaya devam etmiştir. Yüzey gerilimi ölçümlerinin yapıldığı süpernatant katkı miktarının arttırılmasıyla kritik misel konsantrasyonu noktasına ulaşmış ve yüzey gerilimi değeri bu noktadan sonra değişmemiştir. Betonda ise kullanılan katkı miktarlarında böyle bir doygunluk noktasına erişilememiştir.

3.3.5.4 Hava boşluğu boyut dağılımları

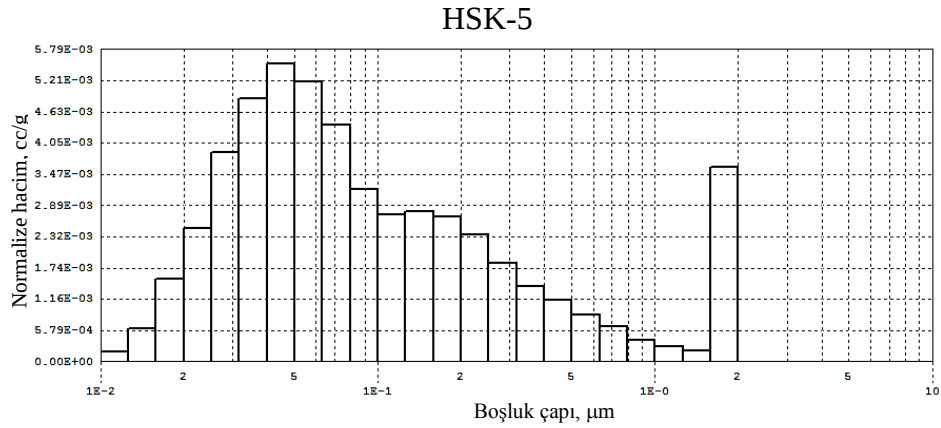
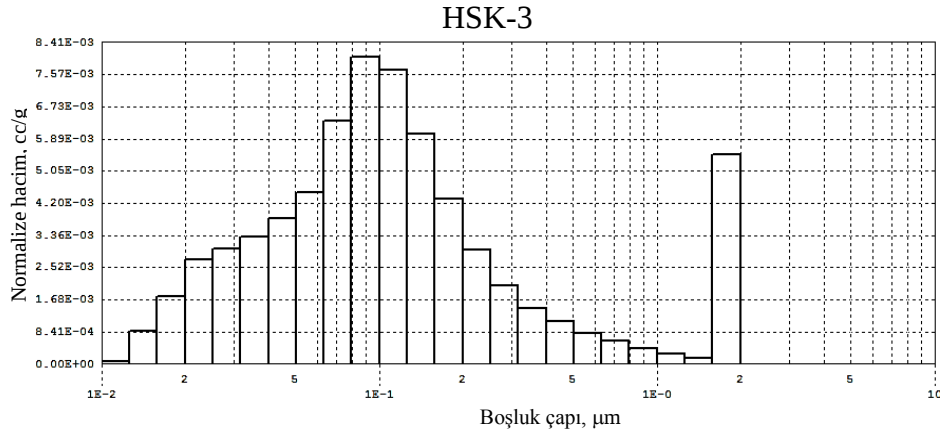
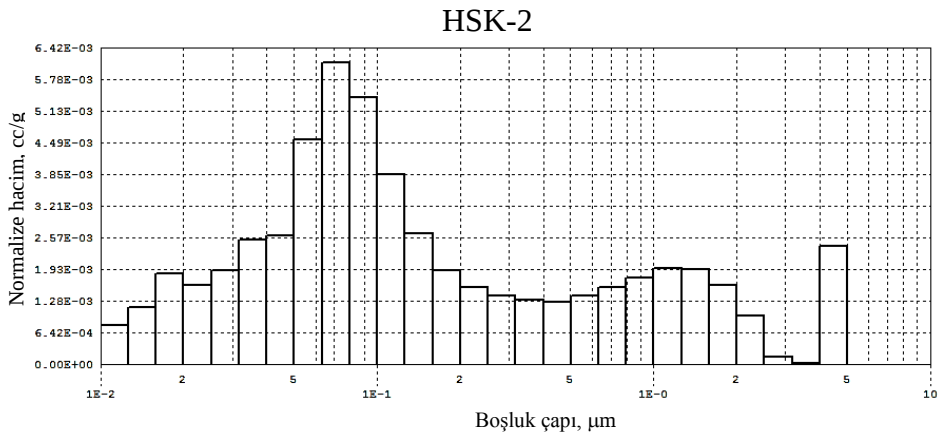
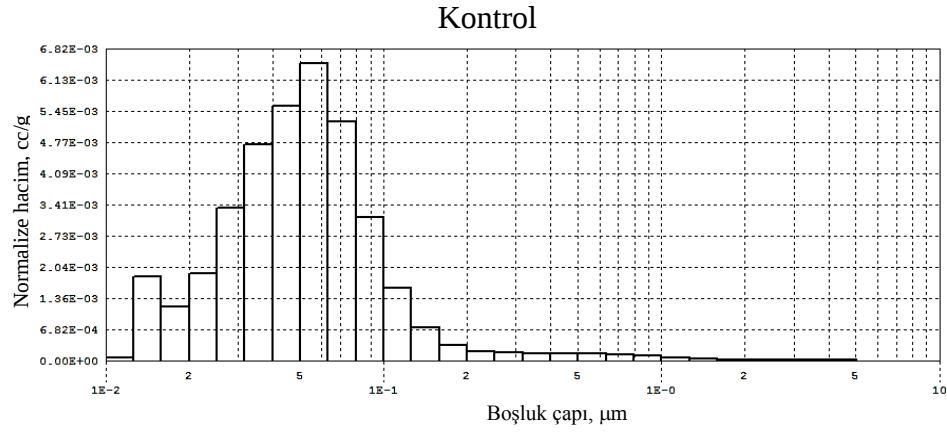
AVA cihazı ile yapılan analiz sonuçları incelenmiş ve yazılım programının verdiği boşluk boyut dağılımı grafiklerinden, katkıların kimyasal esaslarının hava boşluğu boyut dağılımları üzerine etkileri bu grafikler üzerinden de ortaya konmuştur. Boşluk boyut dağılım grafikleri Şekil 3.13'te verilmektedir. Grafiklerde çapı 2 mm'nin altında olan boşluklar dikkate alınmıştır.

Çimento hamurundaki sürüklenmiş hava miktarları % 15 civarında olan harçlarda yapılan analiz sonuçları elde edilen hava boşluğu boyut dağılımı grafiklerinde; reçine esaslı katkıların (1 ve 2) diğer katkılara kıyasla daha büyük boyutlu boşluk oluşturduğu, yağ alkolü (3 ve 5) ve sodyum tuzları karışımı esaslı katkıların (5) daha küçük boyutlu boşluklar oluşturduğu belirlenmiş hatta 100-125 µm arasındaki boşluklar sadece bu katkılarda elde edilmiş, sentetik esaslı 6 numaralı katkının ise orta boyutta hava boşlukları oluşturduğu görülmüştür. Reçine esaslı katkıların oluşturduğu hava boşluğu sistemlerinin özgül yüzey parametrelerinin diğer katkılara kıyasla daha düşük olması daha büyük boyutlu boşluklar oluşturmalarından kaynaklanmış ve elde edilen boşluk boyut dağılımları histogramlarında bunu doğrulamıştır.



Şekil 3.13 : Hava boşluğu boyut dağılımları (AVA).

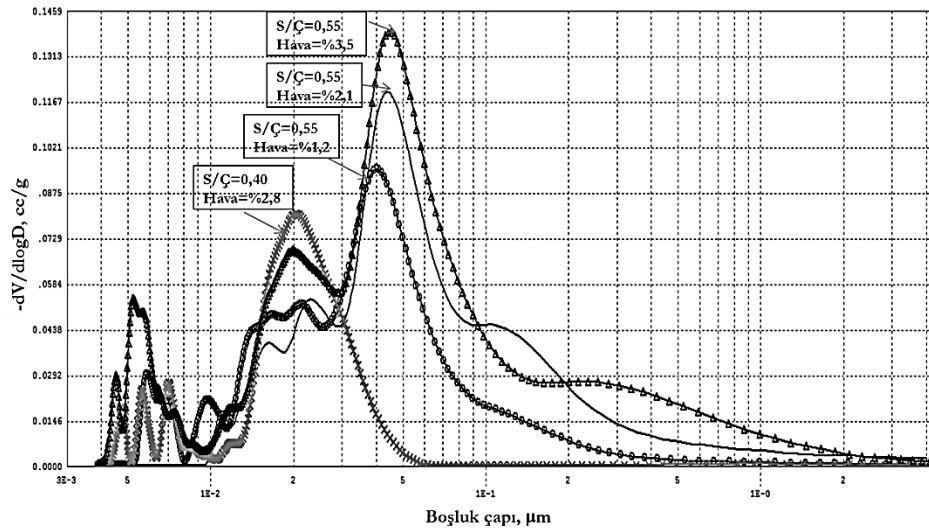
Boşluk boyut dağılımları AVA cihazı ölçümlerinin yanı sıra civalı porozmetri deneyleriyle de araştırılmıştır. Civalı porozimetre deneyleri 3.1.3.7’de anlatılan yöntemle uygun olarak yapılmıştır. Deney sonucu elde edilen boşluk boyut dağılımı histogramları aşağıdaki Şekil 3.14’te verilmektedir.



Şekil 3.14 : Boşluk boyut dağılımları (MIP).

Civalı porozimetri deneyi sonucu elde edilen boşluk boyutu histogramlarında boyutu 5 μm 'nin üzerinde olan boşluklar görülmemiştir. Dolayısıyla, boyutları 10 μm ile 1 mm arasında değişen sürüklenmiş hava boşlukları bu deneyle belirlenememiştir. Çapları 0,2 μm 'den büyük olan boşluklar incelendiğinde; kontrol karışımında bu boyutlarda boşluk oluşmadığı, reçine esaslı katkının (2 nolu) kullanıldığı numunede diğerlerine kıyasla daha büyük boyutlu boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu sonuçlar AVA cihazı ile elde edilen boşluk boyut dağılımları ile uyumludur. Literatürde yer alan çalışmalarda da (Aligazaki ve Cady, 1999; Diamond, 2000), civalı porozimetre deneyi boşluk boyut dağılımlarının özellikle sürüklenmiş hava boşlukları gibi büyük boyutlu boşluklar bulunduran malzemelerde belirlenmesinde, yapılan görüntü analizleri ile karşılaştırılarak uygun bulunmamıştır.

Deneye tabi tutulan harçların su/çimento oranlarının ve uygulanan kürlerin aynı olması nedeniyle kılcal boşluk yapılarının benzer olduğu tespit edilmiştir. Civalı porozimetri deneyi ile elde edilen kritik boşluk çapı değerleri üzerinde hava miktarının ve su/çimento oranının etkisi Şekil 3.15'te verilmiştir. Su/çimento oranı 0,40 olan numune aynı malzemelerin kullanıldığı 6. Bölümde sunulan çalışma kapsamında üretilen betondan alınmıştır.

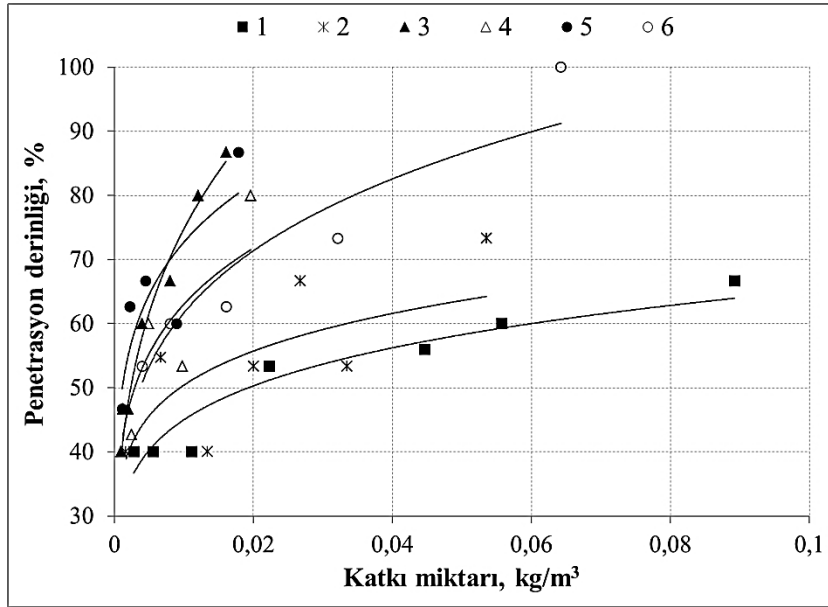


Şekil 3.15 : Kritik boşluk çapı ile hava miktarı ve S/Ç oranı ilişkisi.

Kritik boşluk çapı üzerinde asıl etkenin su/çimento oranı olduğu hava miktarının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Su/çimento 0,55 olan numunelerde hava miktarının artmasıyla numunin boşluklarına giren civa miktarı artmıştır.

3.3.5.5 Cam penetrasyonu deneyi

Harçlar üretildikten hemen sonra gerçekleştirilen cam penetrasyonu deneyine ait sonuçlar Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Katkı miktarları hesaplanırken içerdikleri katı madde miktarları dikkate alınmıştır.

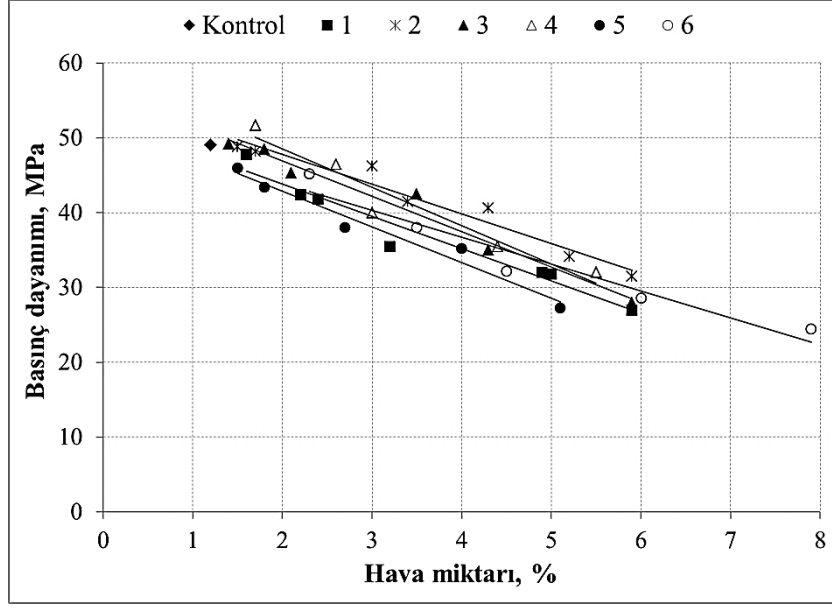


Şekil 3.16 : Penetrasyon derinliğinin katkı miktarı ile değişimi.

Katkı miktarı arttıkça karışımların kıvamları azalmış ve bunun sonucunda cam çubuğun daha çok batmasıyla penetrasyon derinliği artmıştır. Reçine esaslı katkılarda (1 ve 2) katkı miktarı arttırılmasına rağmen penetrasyon derinliği diğer katkılara göre daha az olmuştur. Bu katkıların, köpük drenajı parametreleri üzerindeki etkileri diğer katkılara göre farklıdır ve yüzey gerilimini de diğer katkılara kıyasla daha az düşürmüşlerdir. Farklı deney sonuçları arasındaki uyum bu aşamada ilişkilendirilememiştir.

3.3.5.6 Basınç dayanımı deneyi

Hava sürükleyici katkıların oluşturdukları hava boşluk sistemlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri basınç dayanımı deneyi ile araştırılmıştır. Deney sonucunda, hava miktarının artmasıyla basınç dayanımı değerleri azalmıştır. Hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının bu azalma üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. Basınç dayanımının hava miktarı ile değişimi Şekil 3.17'de verilmektedir.



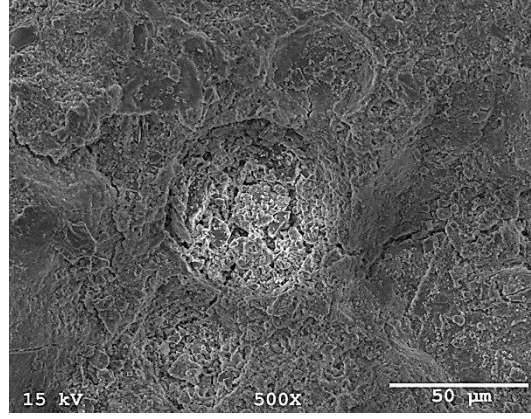
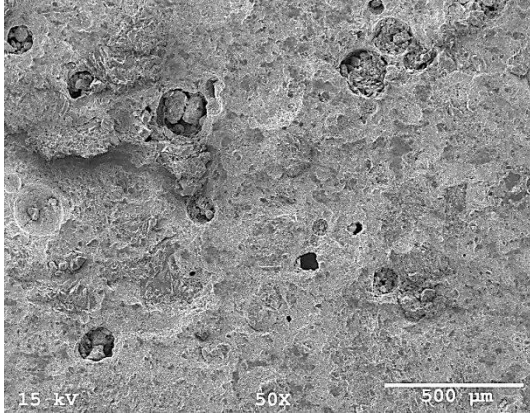
Şekil 3.17 : Basınç dayanımının hava miktarı ile değişimi.

Her % 1 hava miktarına karşılık basınç dayanımları %7,3-10,5 (3,6-5,1 MPa) arasında azalmıştır. Bununla birlikte, katkı kimyasının basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. Katkıların kimyasal esaslarının basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarma-çekme dayanımı üzerindeki etkileri Bölüm 5'te betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmada da araştırılmıştır.

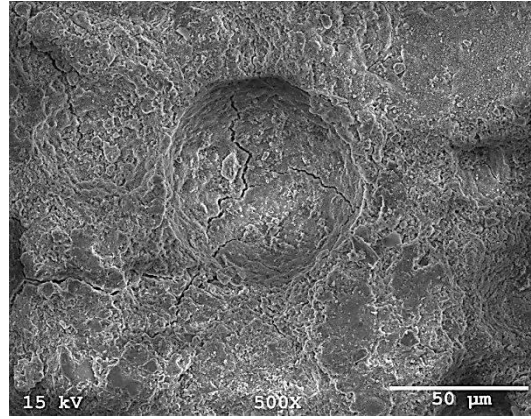
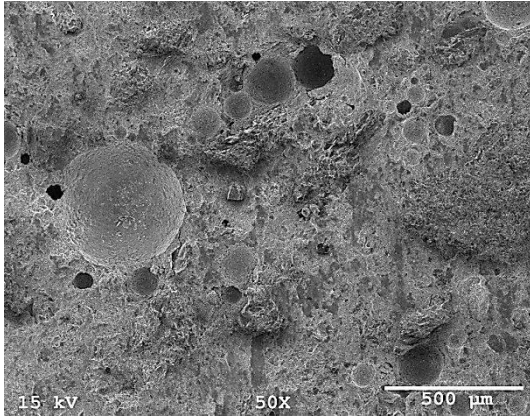
3.3.5.7 Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Hava sürükleyici katkıların oluşturdukları hava boşluklarının, bu boşlukların kabuk yapılarının ve çevrelerinde oluşan yapıların incelenmesi taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüler ile yapılmıştır. Görüntüler 3.3.3.8'de anlatıldığı gibi hazırlanıp belirtilen model cihazda alınmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 3.18'de gösterilmektedir.

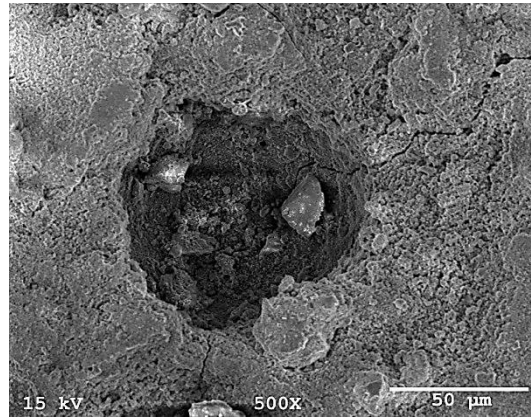
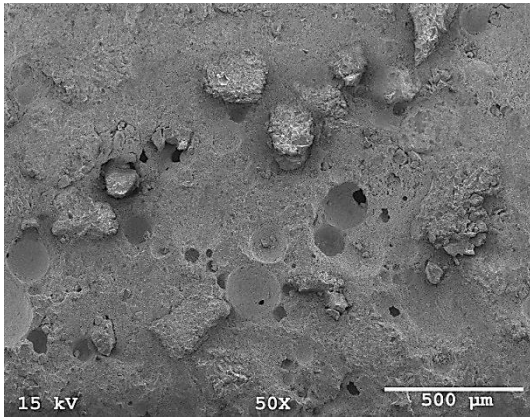
Görüntüler incelendiğinde hava boşluklarının içlerinde ve etraflarında oluşan yapıların kullanılan hava sürükleyici katkıya göre farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Kontrol karışımına ait numuneden alınan görüntüde incelenen boşluk, küçük boyutlu hapsolmuş bir hava boşluğudur ve bu boşluk içinde, boşluk etrafındakinden farklı bir yapılaşma görülmemiştir. 2 nolu hava sürükleyici katkının kullanıldığı numuneden alınan görüntüde, boşluk içinde görülen tanelerin yüzey düzeltme işlemleri esnasında boşluk içine düştüğü düşünülmektedir. 5 nolu hava sürükleyici katkının kullanıldığı numuneden alınan görüntüde, hava boşluğunun içindeki deliklerin, boşluk arkasındaki diğer bir boşluktan kaynaklandığı düşünülmektedir.



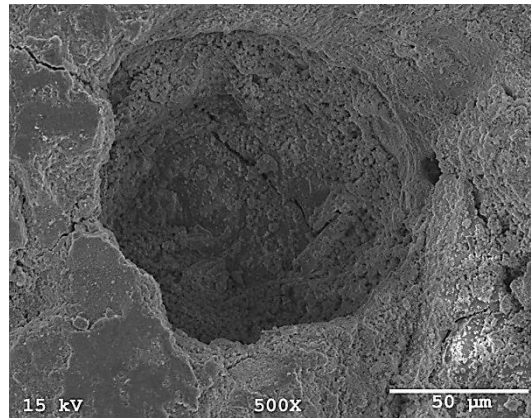
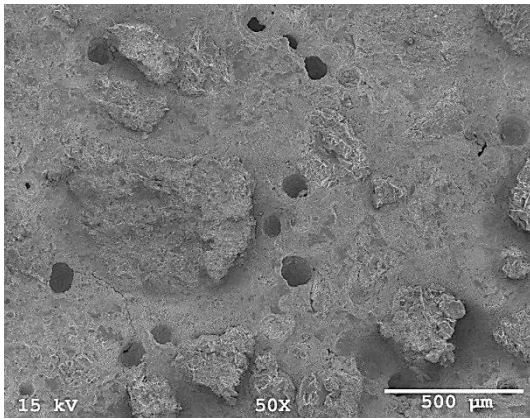
Kontrol



HSK-1

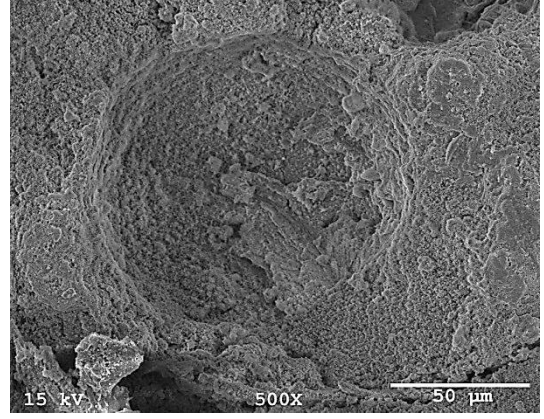
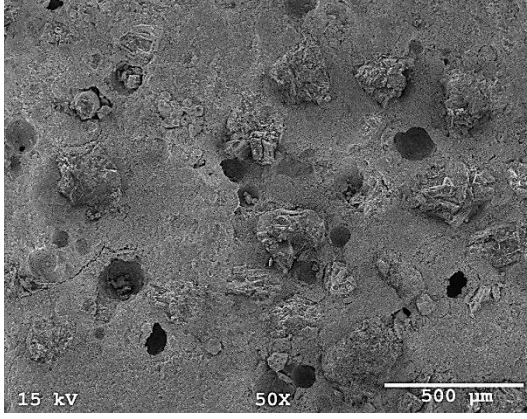


HSK-2

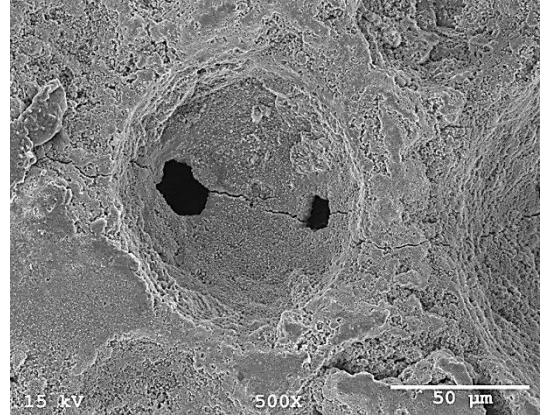
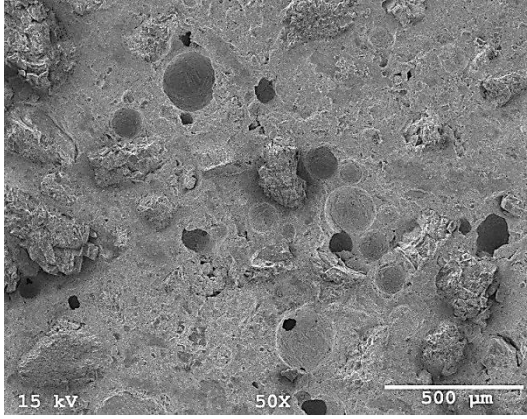


HSK-3

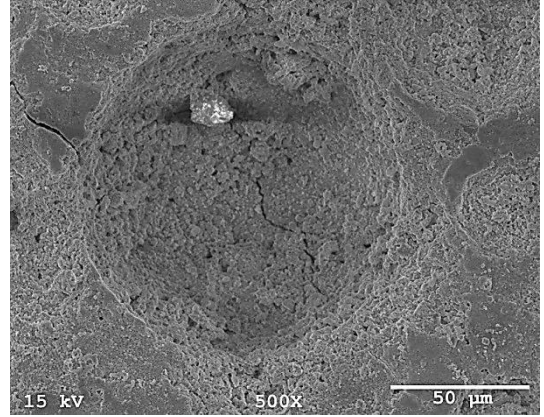
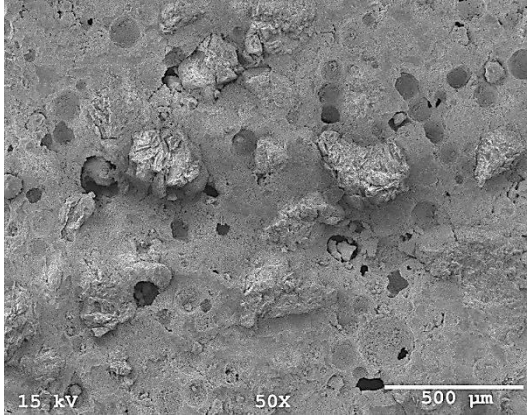
Şekil 3.18 : Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.



HSK-4



HSK-5



HSK-6

Şekil 3.18 (devamı) : Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

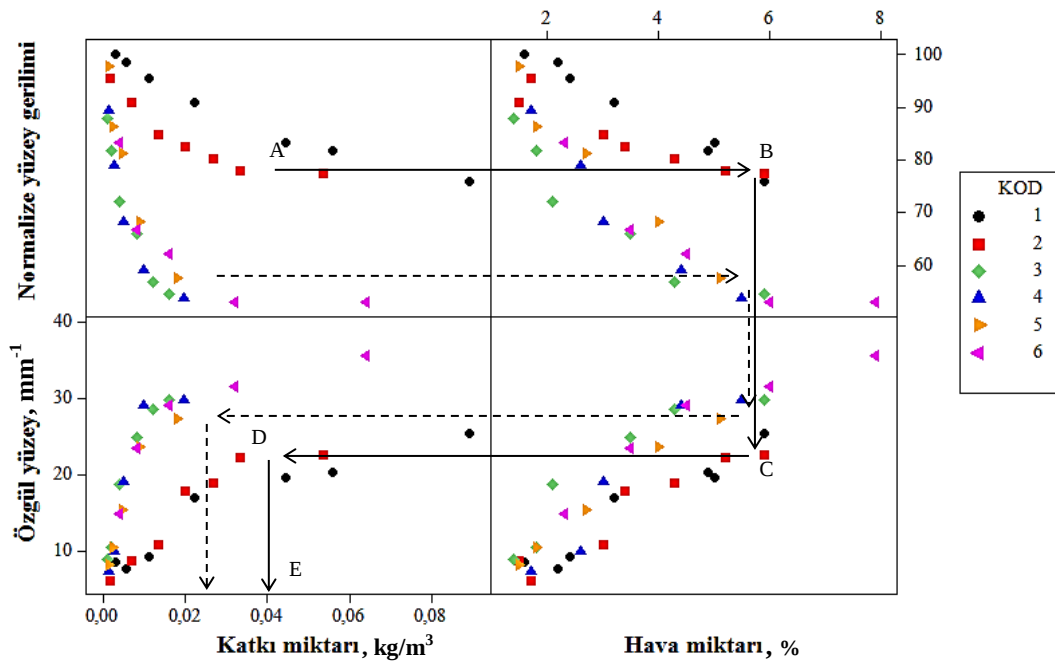
Elli kat büyütme ile elde edilen görüntülerde, 1, 2 ve 5 nolu katkıların diğer katkılara kıyasla daha büyük boşluklar oluşturduğu görülmüştür. Bu gözlemler, taze halde yapılan hava boşluğu sistemi analizleri sonucu elde edilen boşluk boyutu histogramları ile beraber değerlendirildiğinde, 1 ve 2 nolu reçine esaslı katkılarla elde edilen sonuçların uyumlu olduğu söylenebilir. 5 nolu katkı ise, hava boşluğu sistemi analizleri sonucunda daha küçük boyutlu boşluklar oluşturmuştur.

3.3.6 Sonuçlar

Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- 1) Çalışma kapsamında yapılan yüzey gerilimi ölçümleri ve köpük indeksi deneyi ile yeterli hava boşluğu sistemi elde edebilmek için kullanılacak katkı miktarları belirlenmiştir. Yüzey gerilimi ölçümleri ile ayrıca hava boşluğu sisteminin özgül yüzey değeri ile ilgili fikir edinilebilmektedir.

Yukarıda elde edilen sonuçlar Şekil 3.19’da derlenmiştir. Farklı kimyasal esaslara sahip katkıları üzerinde; yüzey gerilimi değerinin katkı miktarının arttırılmasıyla daha fazla düşürülemediği noktalardan (A noktası) çıkarılan oklarla %4-6 arasında (donma-çözülme dayanıklılığı için genel olarak önerilen aralık) hava miktarı elde edilebildiği (B noktası), bu noktalardan aşağıya doğru indirilen oklarla hava miktarlarında elde edilen özgül yüzey değerleri (C noktası) ve özgül yüzey - katkı miktarı grafiğinde bu noktadan (D noktası) aşağıya indirilen okların katkı miktarını kestiği noktalarda (E noktası) da kullanılması gereken katkı miktarları gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Yüzey gerilimi ile boşluk sistemi ve katkı miktarı ilişkileri.

Hava sürükleyici katkıların betonlarda kullanılmadan önce oluşturacağı boşluk boyutu ve kullanım miktarı açısından karşılaştırılmalarında ve değerlendirilmelerinde yüzey gerilimi ölçümlerinin kullanılabilirliği grafiklerden görülmektedir.

- 2) Kullanılan tüm hava sürükleyici katkılar yüzey gerilimi üzerinde etkili olmuşlar ve kullanım miktarları arttıkça yüzey gerilimini düşürmüşlerdir. Katkının kimyasal esasına bağlı olarak belli bir değerden sonra katkı miktarı arttırılsa da yüzey gerilimi düşmemiştir.
- 3) Hava boşluğu sistemi parametreleri yüzey gerilimi ile paralel olarak değişmektedir. Fakat yüzey geriliminin daha fazla düşürülemediği noktalarda katkı miktarının artırılmasıyla hava miktarı ve özgül yüzey artmış, aralık faktörü ise azalmıştır.
- 4) Reçine esaslı hava sürükleyici katkılarla yeterli hava boşluk sistemi elde edebilmek için bu katkılardan diğer katkılara kıyasla daha fazla miktarda kullanılması gerektiği görülmüştür.
- 5) Boşluk boyutu dağılımı histogramlarından, reçine esaslı katkıların büyük, yağ alkolü ve sodyum tuzu esaslı katkıların küçük ve sentetik katkıların orta büyüklükte boşluklar oluşturduğu görülmüştür. Bu oluşumlar taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde de görülmüştür.
- 6) Civalı porozimetre deneyi ile elde edilen boşluk boyut dağılımı histogramlarında sürüklenmiş hava boşluklarının boyut aralığında boşluk görülmemiştir. Bu nedenle, hava boşluklarının boyut dağılımlarının araştırılmasında civalı porozimetre deneyi uygulanabilir bulunmamıştır.
- 7) Köpük drenajı deneyi ile reçine esaslı katkıların daha kararlı hava boşluğu sistemi oluşturacakları belirlenmiştir. Cam penetrasyonu deneyinde de reçine esaslı katkılar diğer katkılara kıyasla daha az penetre olmuşlardır.
- 8) Harçların basınç dayanımları hava miktarının artması ile düşmüştür. Bu etki üzerinde hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının belirgin bir etkisi görülmemiştir.

Köpük indeksi yöntemi yaygın olarak kullanılmasına karşın değerlendirmenin görsel olması ve operatöre bağlı olması nedeniyle hala standartlaşmamıştır. Yüzey gerilimi yönteminin ise standartlaşması için daha fazla araştırmaya ve ileri çalışmalara gereksinim vardır.

4. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILARIN BETON PERFORMANSININ BELİRLENMESİ VE HAVA BOŞLUĞU SİSTEMİ KARARLILIĞI

4.1 Giriş

Betonların donma-çözülme dayanıklılığı açısından hava sürüklemenin önemi belirlendikten sonra araştırmacılar yeterli dayanıklılık için gerekli hava miktarı, hava boşluklarının özellikleri, hava boşluğu oluşumunda beton bileşenlerinin etkileri ve benzeri birçok konuda çalışmalar yapmışlardır. Son yıllarda özellikle Portland Çimentosu Birliği (Portland Cement Association, PCA) ve Amerikan Federal Karayolları İdaresi (U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration, FHWA)’ nin çalışma grupları hava sürükleyici katkı performansı ve sürüklenmiş hava boşluğu kararlılığı konularında çalışmalar yapmaktadır (Ansari ve diğ., 2002; Kozikowski ve diğ., 2005; Camposagrado, 2006; Tanesi ve Meininger, 2006; Nagi ve diğ., 2007). Bu çalışmalar kapsamında farklı kimyasal esaslara sahip birçok hava sürükleyici katkı kullanılmakta ve bu katkıların performansları köpük deneyleri ile değerlendirilmektedir.

Hava sürükleyici katkıların etkinliklerinin köpük oluşturabilme özellikleri ile belirlenmesi 1950’lere dayanmaktadır (Cross ve diğ., 2000). Son yıllarda birçok araştırmada hava sürükleyici katkıların değerlendirilmesinde “Köpük İndeksi” (Foam Index Test) ve “Köpük Drenajı” (Foam Drainage Test) deneyleri yapılmaktadır.

Köpük indeksi deneyi ilk olarak Dodson (1980) tarafından uygulanmıştır (Gebler ve Klieger, 1983). Basit ve ekonomik olmasının yanında kısa sürede değerlendirme yapabilme imkânı da vermektedir. Bu yöntem, betonda yeterli hava boşluğu oluşması için gerekli hava sürükleyici katkı miktarının görsel değerlendirme sonucu belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Son yıllarda geliştirilerek cihazlarla otomatik olarak yapılabilir (Stencel ve diğ., 2009) durumda olmasına karşın henüz standartlaşmamış bir yöntemdir.

Köpük drenajı yöntemi ilk olarak Gutmann (1988) tarafından ekonomik ve basit bir yöntem olarak hava sürükleyici katkıların test edilmesinde kullanılmıştır (Cross ve

diğ, 2000). Cross ve diğ. (2000), Gutmann'nın ölçümlerinde sadece su ve katkı kullanmasından dolayı sonuçların betondaki gerçek durumu temsil etmediğini savunarak kendi yaptıkları köpük drenajı deneylerinde çimento da kullanmışlardır.

4.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı

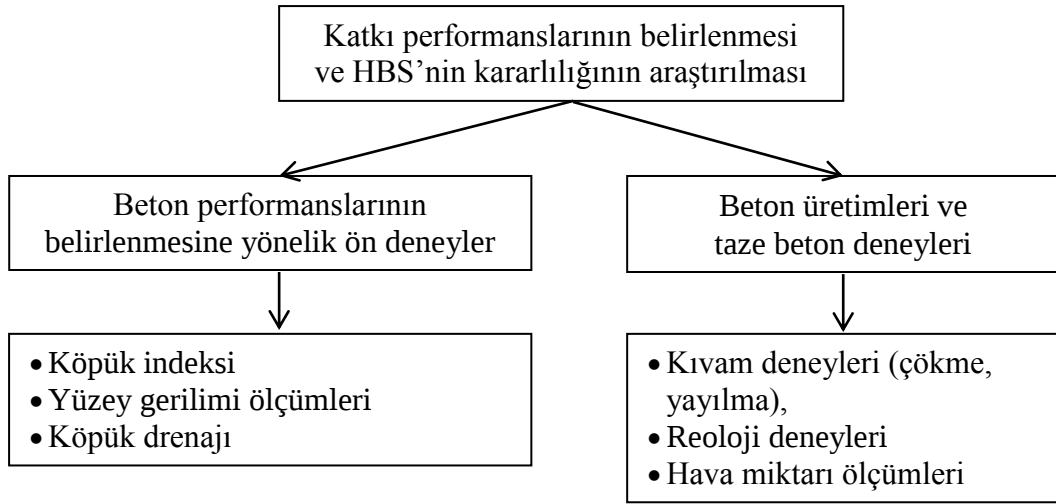
Çalışmada, hava sürükleyici katkıların beton performanslarının ön deneyler yaparak belirlenmesi ve beton ölçeğinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kimyasal esasları farklı olan altı adet hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Katkıların beton performansları, köpük deneylerinin yanı sıra yüzey gerilimi ölçümleri ile farklı özellikteki çimentolar üzerinde ve uçucu kül (UK) kullanımının etkisi ile birlikte araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında, beton performanslarının belirlenmesinin yanında oluşan hava boşluğu sisteminin kararlılığı da araştırılmıştır. Bu amaçla farklı çimento, hava sürükleyici katkı, süperakışkanlaştırıcı katkı ve uçucu kül kullanılarak üretilen betonlar üzerinde üretildikten hemen sonra, 1 saat ve 2 saat sonunda taze beton deneyleri yapılmıştır. Yapılan taze beton deneyleri ile hava boşluğu sisteminin zamana bağlı davranışı incelenmiştir.

4.3 Deneysel Çalışma

Çalışma kapsamında hava sürükleyici katkıların betonlarda yeterli hava boşluğu oluşturabilmeleri için gerekli katkı miktarı ve hava boşluklarının kararlılıkları deneysel olarak araştırılmıştır. Hava sürükleyici katkıların beton performansları, köpük deneylerinin yanı sıra yüzey gerilimi ölçümlerine dayanan ve çalışma kapsamında geliştirilen yüzey gerilimi yöntemiyle de incelenmiştir. Hava boşluklarının kararlılıkları üzerinde beton kıvamının etkisi çökme ve yayılma deneylerinin yanında reoloji ölçümleri yapılarak da araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar, beton üretilmeden katkıların performanslarının belirlenmesine yönelik ön deneyleri kapsayan çalışmalar ve beton üretimleri yapılarak ön deneylerin değerlendirilmesi ve taze beton özelliklerin araştırıldığı çalışmalar olarak iki kısımda yapılmıştır. Deneysel çalışmalar şematik olarak Şekil 4.1'de sunulmaktadır.



Şekil 4.1 : Deneysel çalışmanın şematik gösterimi.

4.3.1 Kullanılan malzemeler

4.3.1.1 Çimento ve uçucu kül

Çalışmada alkali içerikleri farklı olan 3 adet çimento kullanılmıştır. Çimentolara ve uçucu küle ait kimyasal bileşim ve diğer özellikler Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Çimentoların ve uçucu külün kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Bileşen, %	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 N	CEM III/B 32,5 N	Uçucu kül (Tunçbilek)
CaO	63,74	64,03	47,88	2,35
MgO	1,20	1,10	5,05	-
SO ₃	3,01	2,95	1,36	0,44
SiO ₂	20,04	20,10	30,58	58,94
Al ₂ O ₃	5,24	3,89	9,00	19,50
Fe ₂ O ₃	3,56	5,05	2,78	10,25
Cl ⁻	0,0429	0,005	0,0064	0,006
Na ₂ O	0,27	0,15	0,41	0,16
K ₂ O	0,82	0,62	0,80	1,71
Toplam alkali (Na ₂ O eşd.)	0,81	0,56	0,93	1,29
Çözünmeyen kalıntı	0,40	<0,17	0,68	-
Kızdırma kaybı	1,36	2,09	0,49	0,71
Fiziksel Özellikler				
Özgül ağırlık, g/cm ³	3,14	3,16	3,00	2,23
Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g	3800	3800	5250	-
Priz başlangıcı, dak.	102	205	190	-
Priz bitişi, dak.	162	330	330	-
Mekanik özellikler				
Erken dayanım, 2 gün	30,9	24,3	12,3	-
Erken dayanım, 7 gün	43,4	40,0	21,5	-
Standart dayanım, 28 gün	55,5	51,4	35,4	-

Uçucu külün, 45 µm altı elek bakiyesi %15,5, 28 günlük aktivite endeksi %79,7 ve serbest CaO ve reaktif SiO₂ içeriği sırasıyla %0,05 ve %44,97’dir.

4.3.1.2 Agregata

Kırma kum, kırma taş I ve II devoniyen kalkerinden elde edilen agregalardır. Doğal kum ve kırma taş agregalarına ait fiziksel özellikler ve elek analizi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2 : Agregalara ait fiziksel özellikler ve elek analizi sonuçları.

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Elek boyutu, mm - % Geçen								
			0,063	0,25	0,5	1	2	4	8	16	22
Doğal kum	2,63	1,2	0,4	7,4	98,2	98,9	99,3	99,6	100	100	100
Kırma kum	2,68	0,9	4,1	9,5	20,7	32,8	62,1	94,6	100	100	100
Kırma taş I	2,71	0,4	1,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,5	42,7	100	100
Kırma taş II	2,71	0,3	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	33,8	100

4.3.1.3 Hava sürükleyici katkılar

Çalışmada kullanılan hava sürükleyici katkıların tanımlamaları fiziksel özellikleri ve kodları Bölüm 3’te (Çizelge 3.4) verilmektedir. Katkılara ait FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) analizleri Ek B’de verilmektedir.

4.3.1.4 Süperakışkanlaştırıcı katkılar

Çalışmada yüksek oranda su azaltıcı özellikte 2 adet yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkılara ait fiziksel özellikler Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Çizelge 4.3 : Süperakışkanlaştırıcı katkılara ait fiziksel özellikler.

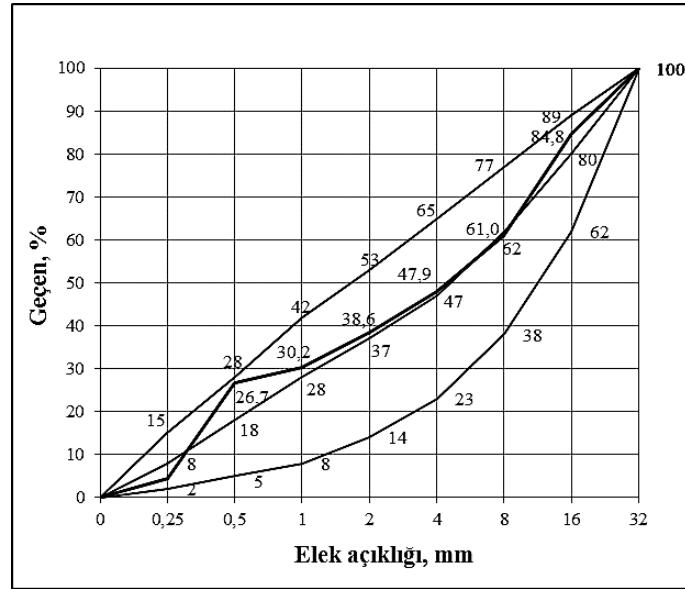
Katkının kimyasal esası	Yoğunluk kg/dm ³	pH	Katı madde %
Modifiye fosfonat (MF)	1,06	4,15	30
Polikarboksilik eter (PE)	1,09	6,45	45

4.3.2 Beton karışımı tasarımları

Deneyisel çalışmanın betonlar üzerinde sürdürülen bölümü 3 aşamada tamamlanmıştır. Bu aşamalarda, hava boşluğu sistemi üzerine uçucu kü kullanımının etkisi (1), beton kıvamının etkisi (2) ve çimento tipinin etkisi (3) araştırılmıştır.

4.3.2.1 Agrega karışım granülometrisi

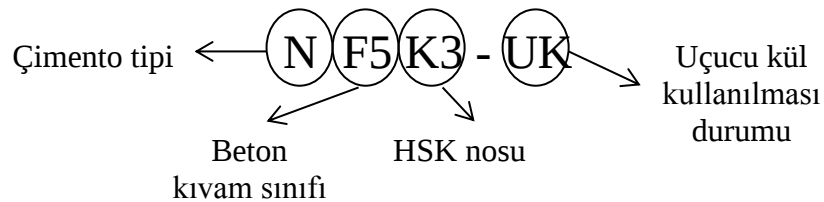
Doğal kum' un %21, kırma kum' un %28, kırma taş I' in %28 ve kırma taş II' nin %23 oranında kullanılmasıyla elde edilen karışıma ait granülometri eğrisi Şekil 4.2'de sunulmaktadır.



Şekil 4.2 : Agrega karışımına ait granülometri eğrisi.

4.3.2.2 Beton bileşimleri ve malzeme miktarları

Tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,40 olarak sabit tutulmuştur. Karışım kodlamalarında çimento tipi, betonun kıvam sınıfı, hava sürükleyici katkı ve karışımda uçucu kül kullanılması durumu belirtilmiştir (Şekil 4.3). Örneğin, NS4K1 kodu ile CEM I 42,5N tipi çimentonun kullanıldığı, çökme değeri 160-210 mm aralığında olan (S4 kıvamında) ve 1 nolu hava sürükleyici katkının kullanıldığı karışım gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : Karışım kodları.

Uçucu kül kullanımının hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı birinci aşamada üretilen beton bileşimleri ve malzeme miktarları Çizelge 4.4'te verilmektedir. NS4K3-UK kodlu karışımda hava sürükleyici katkı 3 farklı miktarda kullanılmış olup bu karışımların kodlarına a,b ve c harfleri eklenmiştir.

Çizelge 4.4 : Beton bileşimleri ve malzeme miktarları (1. aşama).

Malzemeler, Kg/m ³	NS4K1	NS4K1-UK	NS4K3	NS4K3-UK (a)	NS4K3-UK (b)	NS4K3-UK (c)
Çimento	330	300	330	300	300	300
Uçucu kül	0	75	0	75	75	75
Su	132	132	132	132	132	132
Doğal kum	391	392	386	378	373	351
Kırma kum	532	533	524	514	507	477
Kırma taş I	538	539	530	520	512	482
Kırma taş II	442	443	435	427	421	396
Süperakışkanlaştırıcı (modifiye fosfonat)	5,3 (%1,6)	4,3 (%1,3)	5,3 (%1,6)	4,3 (%1,3)	4,3 (%1,3)	4,3 (%1,3)
Hava sürükleyici katkı	0,182 (%0,055)	0,182 (%0,055)	0,099 (%0,03)	0,149 (%0,045)	0,165 (%0,05)	0,149 (%0,06)
Birim ağırlık	2369	2418	2343	2351	2324	2217

Beton kıvamının hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı ikinci aşamada üretilen beton bileşimleri ve malzeme miktarları Çizelge 4.5'te verilmektedir. Çimento tipinin hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı üçüncü aşamada üretilen beton bileşimleri ve malzeme miktarları Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Beton bileşimleri ve malzeme miktarları (2. aşama).

Malzemeler, kg/m ³	NF4K1	NF4K3-UK	NF5K1-UK	NF5K3-UK
Çimento	330	300	300	300
Uçucu kül	0	75	75	75
Su	132	132	132	132
Doğal kum	390	377	377	377
Kırma kum	530	513	512	512
Kırma taş I	536	518	518	518
Kırma taş II	440	426	426	425
Süperakışkanlaştırıcı (modifiye fosfonat)	8,3 (%2,5)	6,6 (%2,0)	6,6 (%2,0)	7,3 (%2,2)
Hava sürükleyici katkı	0,182 (%0,055)	0,149 (%0,045)	0,33 (%0,1)	0,149 (%0,045)
Birim ağırlık	2365	2348	2347	2347

Çizelge 4.6 : Beton bileşimleri ve malzeme miktarları (3. aşama).

Malzemeler, kg/m ³	RS4K3	RS4K3-UK	RF5K1-UK	RF5K3-UK
Çimento	330	300	300	300
Uçucu kül	0	75	75	75
Su	132	132	132	132
Doğal kum	409	393	378	378
Kırma kum	556	533	514	514
Kırma taş I	562	539	519	520
Kırma taş II	462	443	427	427
Süperakışkanlaştırıcı (MS veya PE)	7,6* (%2,3)	8,3* (%2,5)	4,6** (%1,4)	4,3** (%1,3)
Hava sürükleyici katkı	0,165 (%0,05)	0,33 (%0,1)	0,281 (%0,085)	0,165 (%0,05)
Birim ağırlık	2458	2424	2349	2350

*Modifiye fosfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

** Polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

4.3.2.3 Üretim ve taze beton deneyleri

Karıştırma süresi ve karıştırıcı tipi hava sürüklemeye etki etmektedir (Bkz. 2.4.3). Bu nedenle, kullanılan malzemeler için karıştırılma sırası ve karıştırma süreleri oluşturulmuştur. Üretimde malzeme eklenme sırası ve karıştırma süreleri Çizelge 4.7’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7 : Üretimde malzeme eklenme sırası ve karıştırma süreleri.

No	İşlem	Süre, saniye
1	Agregaların ve karışım suyunun 1/4'ünün karıştırılması	30
2	Çimentonun karışıma eklenmesi	-
3	Sırasıyla, hava sürükleyici katkının, karışım suyunun kalan kısmının ve süperakışkanlaştırıcı katkının eklenmesi	60
4	Karıştırma	210

Karıştırma süresi toplamda 5 dakika sürmüştür. Karıştırma işleminden sonra taze beton deneyleri 15 dakika içinde yapılmıştır. Taze beton deneyleri 1. ve 2. saat sonunda tekrarlanmıştır. Beton karışımları 35 dm³ kapasiteli betoniyerde üretilmiştir.

4.3.3 Deneysel yöntemler

4.3.3.1 Beton reometresi ile reolojik parametrelerinin belirlenmesi

Betonların reolojik özellikleri reometre (ICAR Rheometer) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.4). Ölçümler betonlardan alınan 20 dm³’lük örnekler üzerinde yapılmaktadır. Reometrenin ucundaki pervanenin beton içinde farklı hızlarda döndürülmesiyle reolojik akış modellerine ait parametreler olan statik ve dinamik akma gerilmeleri ile plastik viskozite değerleri belirlenmektedir.

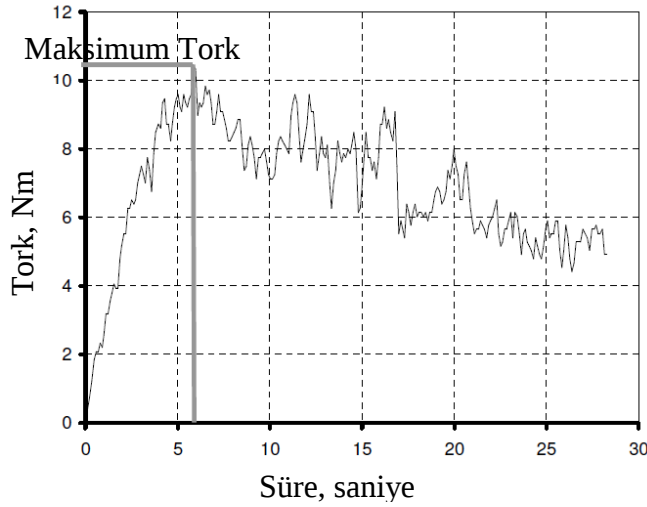


Şekil 4.4 : Beton reometresi.

Statik akma gerilmesi, pervanenin beton içinde 0,025 devir/saniye gibi sabit düşük bir hızla döndürülmesi sonucu torkdaki değişimden elde edilir (Şekil 4.5). Aşağıdaki denklem kullanılarak statik akma gerilmesi hesaplanmaktadır.

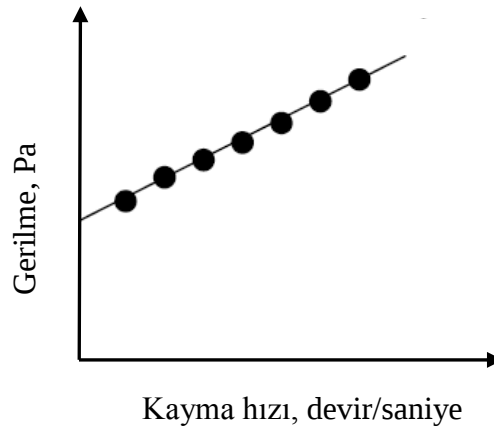
$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad (4.1)$$

Burada, τ , T , r ve h sırasıyla statik akma dayanımı, tork, pervane yarıçapı ve pervane uzunluğudur.



Şekil 4.5 : Tipik tork gelişim eğrisi.

Dinamik akma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri pervanenin 20 saniye 0,5 devir/saniye hızda döndürülmesinden sonra hızın kademeli olarak 7 adımda 0,05 devir/saniye'ye düşürülmesi ile elde edilen grafikten hesaplanmaktadır. Grafiğin eğimi plastik viskoziteyi, gerilme eksenini kestiği nokta ise dinamik akma gerilmesini vermektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Tipik gerilme-kayma hızı grafiği.

Reometre ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen reoloji parametreleri olan statik ve dinamik akma gerilmeleri ve plastik viskozite değerleri, geleneksel kıvam deneyleri olan çökme ve yayılma değerleri ile uyumludur (Koehler ve Fowler, 2004).

4.3.4 Deney sonuçları

4.3.4.1 Performans deneylerinin sonuçları

Çalışmada, hava sürükleyici katkıların performanslarının belirlenmesine yönelik olarak köpük indeksi, yüzey gerilimi ölçümleri ve köpük drenajı deneyleri yapılmıştır.

Köpük indeksi deneyi:

Köpük indeksi deneyleri 3.3.3.2’de anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Uçucu külün kullanıldığı deneylerde, uçucu kül çimentonun ağırlıkça %20’si ile yer değiştirilerek (20 g çimento yerine 16 g çimento 4 g uçucu kül) kullanılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.8’de verilmektedir. Katkı performanslarının karşılaştırıldığı durumlarda katkıların içerdikleri katı madde miktarları önemlidir. Bu nedenle, köpük indeksi değerleri katkıların katı madde miktarları ile çarpılarak Çizelge 4.8’de parantez içinde verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Köpük indeksi deney sonuçları (ml/kg).

Çimento	Katkı no					
	1	2	3	4	5	6
CEM I 42,5 N	0,40 (0,05)	0,25 (0,02)	0,20 (0,01)	0,20 (0,01)	0,20 (0,01)	0,15 (0,03)
CEM I 42,5 N + UK	1,00 (0,13)	0,60 (0,05)	0,45 (0,02)	0,40 (0,02)	0,65 (0,03)	0,25 (0,05)
CEM I 42,5 R	0,13 (0,02)	0,13 (0,01)	0,13 (0,01)	0,10 (0,01)	0,13 (0,01)	0,05 (0,01)
CEM I 42,5 R + UK	0,55 (0,07)	0,35 (0,03)	0,30 (0,01)	0,25 (0,01)	0,40 (0,02)	0,10 (0,02)
CEM III/B 32,5 N	0,45 (0,06)	0,35 (0,03)	0,30 (0,01)	0,25 (0,01)	0,45 (0,02)	0,15 (0,03)
CEM III/B 32,5 N + UK	1,00 (0,13)	0,80 (0,06)	0,60 (0,03)	0,55 (0,03)	0,95 (0,05)	0,275 (0,05)

Yüzey gerilimi deneyi:

Yüzey gerilimi deneyleri 3.3.3.1’de anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Uçucu külün kullanıldığı deneylerde, uçucu kül çimentonun ağırlıkça %20’si ile yer değiştirilerek (50 g çimento yerine 40 g çimento 10 g uçucu kül) kullanılmıştır. Yüzey gerilimi

ölçümleri sonucu çimento tipinin ve uçucu kül kullanımının belirgin bir etkisi elde edilememiştir. Tüm katkılar çimento tipi ve uçucu kül kullanımından bağımsız olarak yüzey gerilimini düşürmüşlerdir. Buna neden olarak hazırlanan süpernatantta çimentodaki suda çözünen benzer tuzların, sodyum ve potasyum hidroksitlerin bulunması ve bunun sonucunda da ölçümler arasında çok az farklılık oluşması düşünülmektedir. Ölçümler sonucu elde edilen yüzey gerilimi aralıkları Çizelge 4.9’da verilmektedir. Çimento tipi ve uçucu kül kullanımlarına ait yapılan deneylere ait sonuçlar ise EK C’de verilmektedir.

Çizelge 4.9 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.

Katkı miktarı** %	Yüzey gerilimi, mN/m					
	HSK 1	HSK 2	HSK 3	HSK 4	HSK 5	HSK 6
0	66-65	66-65	66-65	66-65	66-65	66-65
0,002	*	*	*	*	*	53-51
0,004	66-63	65-63	60-55	59-55	62-58	47-46
0,006	*	*	*	*	*	45-43
0,008	65-61	64-61	55-50	54-48	57-54	44-40
0,01	*	*	*	*	*	42-38
0,012	64-60	64-60	48-44	48-44	50-47	41-37
0,016	63-60	62-57	45-42	45-42	45-44	39-36
0,02	62-59	61-55	43-40	43-40	44-41	37-35
0,03	61-57	59-54	40-38	40-38	42-39	36-34
0,04	59-56	55-51	39-36	38-36	40-38	35-34
0,06	54-53	54-49	38-34	36-34	38-37	*
0,08	53-50	53-48	35-34	35-34	36-34	*
0,12	52-49	51-48	*	*	*	*
0,2	50-49	50-46	*	*	*	*

*Yüzey gerilimi deneyi yapılmamıştır.

**Katkı miktarları, çimento ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.

Köpük drenajı deneyi:

Köpük drenajı deneyleri 3.3.3.3’te anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Uçucu külün kullanıldığı deneylerde, uçucu kül çimentonun ağırlıkça %20’si ile yer değiştirilerek (5 g çimento yerine 4 g çimento 1 g uçucu kül) kullanılmıştır. Köpük drenajı deney sonuçları Ek D’de, deney sonuçları kullanılarak hesaplanan V_0 , $-1/k$, drenaj (%) ve korelasyon katsayısı (r) değerleri ise Çizelge 4.10’da sunulmaktadır. Hesaplamalarda 1-60 dakika arasındaki veriler kullanılmıştır.

Çizelge 4.10 : Köpük drenajı deneyi sonucu hesaplanan parametreler.

Çimento	Deney parametresi	HSK 1	HSK 2	HSK 3	HSK 4	HSK 5	HSK 6
CEM I 42,5 N	V_0	210	225	293	271	303	239
	$-1/k$	173	251	302	332	320	316
	r	-0,81	-0,92	-0,93	-0,87	-0,94	-0,79
	% drenaj	32	27	5	13	2	23
CEM I 42,5 N+UK	V_0	213	227	294	274	304	241
	$-1/k$	176	254	319	330	317	322
	r	-0,82	-0,92	-0,93	-0,87	-0,95	-0,79
	% drenaj	31	27	5	12	2	22
CEM I 42,5 R	V_0	239	231	302	280	308	269
	$-1/k$	227	253	311	332	296	329
	r	-0,92	-0,93	-0,96	-0,88	-0,97	-0,88
	% drenaj	23	25	3	10	1	13
CEM I 42,5 R+UK	V_0	224	228	296	279	317	256
	$-1/k$	217	236	318	340	286	331
	r	-0,90	-0,91	-0,94	-0,88	-0,97	-0,85
	% drenaj	28	26	5	10	0	17
CEM III/B 32,5 N	V_0	217	224	281	273	294	253
	$-1/k$	207	252	329	333	333	328
	r	-0,87	-0,91	-0,89	-0,88	-0,93	-0,84
	% drenaj	30	28	9	12	5	18
CEM III/B 32,5 N+UK	V_0	218	222	283	276	305	251
	$-1/k$	192	253	333	335	311	328
	r	-0,85	-0,92	-0,91	-0,88	-0,96	-0,83
	% drenaj	30	28	9	11	2	19

4.3.4.2 Taze beton deney sonuçları

Uçucu kül kullanımının hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı birinci aşamada üretilen betonlara ait deney sonuçları Çizelge 4.11’de verilmektedir. Hava miktarları ASTM C 231 standardına göre basınç yöntemi ile ölçüm yapan, B tipi (Şekil 5.2) hava ölçer ile belirlenmiştir. Reoloji modellerine ait parametreler olan statik ve dinamik akma gerilmeleri ve plastik viskozite değerleri 4.3.3.1’de açıklanan yöntemle elde edilmiştir. Malzemeler, üretimin 1 gün öncesinde laboratuvara konulmuş ve üretimler 21 ± 2 °C’de laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece tüm karışımlarda sıcaklık 21 ± 2 °C elde edilerek, sıcaklığın sonuçlar üzerindeki etkisi azaltılmıştır.

Çizelge 4.11 : Taze beton deney sonuçları (1. aşama).

Deney zamanı (dak.)	Deney parametresi	NS4K1	NS4K1-UK	NS4K3	NS4K3-UK (a)	NS4K3-UK (b)	NS4K3-UK (c)
0	Çökme, cm	17	20	18,5	18	19	19
	Yayılma, cm	-	-	-	-	-	-
	Statik akma gerilmesi, Pa	1760	-	1618	1240	-	-
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	49	-	63	5,2	-	-
	Plastik viskozite, Pa.s	96,5	-	83	72	-	-
	Birim ağırlık, kg/m ³	2384	2436	2374	2374	2316	2217
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	5,0	2,4	6,0	4,6	6,0	9,5
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	4,4	1,7	4,7	4,1	6,3	9,7
60	Çökme, cm	17,5	-	19	19	-	-
	Yayılma, cm	-	-	-	-	-	-
	Statik akma gerilmesi, Pa	1312	-	874	1070	-	-
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	78	-	63	0,1	-	-
	Plastik viskozite, Pa.s	88	-	66	73	-	-
	Birim ağırlık, kg/m ³	2350	-	2295	2288	-	-
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	6,5	-	7,5	7,5	-	-
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	5,8	-	7,9	7,6	-	-
120	Çökme, cm	17,5	-	19	18	-	-
	Yayılma, cm	-	-	-	-	-	-
	Statik akma gerilmesi, Pa	1600	-	978	808	-	-
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	198	-	49	15	-	-
	Plastik viskozite, Pa.s	114	-	73	89	-	-
	Birim ağırlık, kg/m ³	2329	-	2227	2205	-	-
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	7,5	-	9,8	10,8	-	-
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	6,6	-	10,6	10,9	-	-

Not: S4 (160-210 mm).

Uçucu kül kullanımının hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı birinci aşamada uçucu kül kullanılan betonlarda (NS4K3-UK (a) hariç) reoloji deneyleri ve saatlik ölçümler yapılmamıştır.

Beton kıvamının hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı ikinci aşamada üretilen betonlara ait deney sonuçları Çizelge 4.12’de verilmektedir.

Çizelge 4.12 : Taze beton deney sonuçları (2. aşama).

Deney zamanı (dak.)	Deney parametresi	NF4K1	NF4K3-UK	NF5K1-UK	NF5K3-UK
0	Çökme, cm	25	25	25	25
	Yayılma, cm	50	50	60	60
	Statik akma gerilmesi, Pa	567	243	285	287
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	15	15	0,5	4
	Plastik viskozite, Pa.s	61	54	53	38
	Birim ağırlık, kg/m ³	2404	2417	2355	2459
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	4,5	4,0	5,8	2,6
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	3,4	2,2	4,6	0,5
60	Çökme, cm	25	25	25	24
	Yayılma, cm	50	48	60	55
	Statik akma gerilmesi, Pa	501	377	430	270
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	0,1	17	22	41
	Plastik viskozite, Pa.s	56	51	41	53
	Birim ağırlık, kg/m ³	2347	2343	2317	2365
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	7,0	6,8	7,0	5,0
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	5,7	5,1	6,2	4,2
120	Çökme, cm	25	24	24	24
	Yayılma, cm	50	48	55	55
	Statik akma gerilmesi, Pa	875	355	420	359
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	72	28	45	0,1
	Plastik viskozite, Pa.s	78	48	55	45
	Birim ağırlık, kg/m ³	2375	2219	2258	2279
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	5,5	10,0	8,5	8,2
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	4,6	10,2	8,6	7,7

Not: F4 (490-550 mm), F5(560-620 mm).

Çimento tipinin hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı üçüncü aşamada üretilen betonlara ait deney sonuçları Çizelge 4.13'te verilmektedir.

Çizelge 4.13 : Taze beton deney sonuçları (3. aşama).

Deney zamanı (dak.)	Deney parametresi	RS4K3	RS4K3-UK	RF5K1-UK	RF5K3-UK
0	Çökme, cm	16	18	25	25
	Yayılma, cm	-	-	57	58
	Statik akma gerilmesi, Pa	-	-	530	495
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	-	-	4,6	0,1
	Plastik viskozite, Pa.s	-	-	111	112
	Birim ağırlık, kg/m ³	2482	2460	2402	2409
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	1,5	2,0	5,0	4,5
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	0,5	0,5	2,9	2,6
60	Çökme, cm	-	-	23	24
	Yayılma, cm	-	-	42	50
	Statik akma gerilmesi, Pa	-	-	696	665
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	-	-	16,5	0,1
	Plastik viskozite, Pa.s	-	-	143	115
	Birim ağırlık, kg/m ³	-	-	2403	2417
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	-	-	4,7	4,4
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	-	-	2,9	2,3
120	Çökme, cm	-	-	22	20
	Yayılma, cm	-	-	38	32
	Statik akma gerilmesi, Pa	-	-	940	1027
	Dinamik akma gerilmesi, Pa	-	-	14	0,1
	Plastik viskozite, Pa.s	-	-	160	165
	Birim ağırlık, kg/m ³	-	-	2417	2421
	Hava miktarı, % (ASTM C 231-B)	-	-	4,0	4,0
	Hava miktarı, % (ASTM C 138)	-	-	2,3	2,2

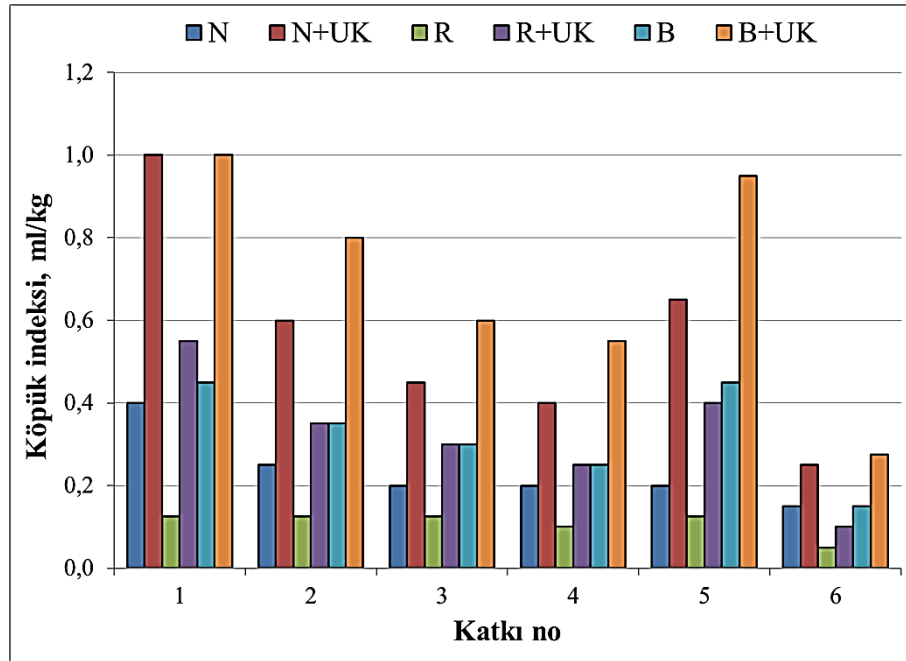
Not: S4 (160-210 mm), F5(560-620 mm).

CEM I 42,5 R tipi çimentonun ve modifiye fosfonat esaslı katkının kullanıldığı (RS4K3 ve RS4K3-UK) betonlarda reoloji deneyleri ve saatlik ölçümler yapılmamıştır.

4.3.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

4.3.5.1 Köpük indeksi

Hava sürükleyici katkıların betonda kullanım miktarlarının belirlenmesine yönelik yapılan köpük indeksi deneylerinde çimento tipinin ve uçucu kül kullanımının etkileri araştırılmıştır. Köpük indeksi deney sonuçları Şekil 4.7’de verilmektedir (CEM I 42,5 N (N), CEM I 42,5 R (R), CEM III/B 32,5 N (B) ve Uçucu kül (UK)).

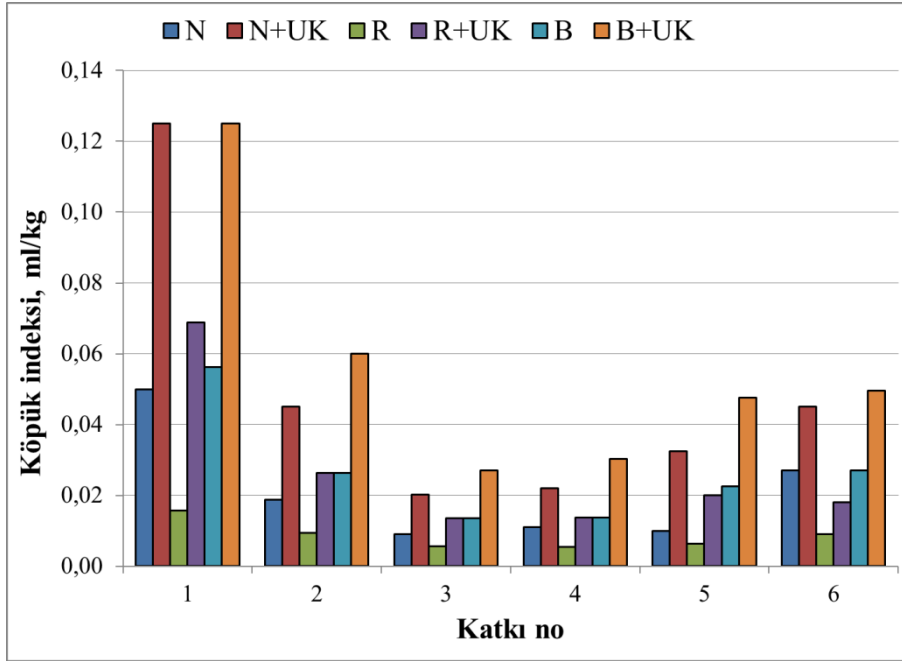


Şekil 4.7 : Köpük indeksi deney sonuçları.

Köpük indeksi deney sonuçlarından uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkı miktarını çimento tipinden bağımsız olarak arttırdığı görülmüştür. R tipi çimentonun N tipi çimentoya kıyasla daha az katkı miktarı gerektirdiği hava sürükleyici katkının esasından bağımsız olarak elde edilmiştir. Eşit özgül yüzey alanına ve yakın kimyasal bileşen miktarlarına sahip çimentolardaki bu farklılığın nedenin alkali miktarlarındaki farklılıktan ileri geldiği düşünülebilir. Literatürde (Bkz. 2.4.1), çimento alkali miktarının hava sürüklemeyi arttırdığı bilinmektedir. Alkali miktarı daha fazla olan CEM I 42,5 R (R) çimentosu en düşük köpük indeksi değerlerine sahip dolayısıyla en düşük katkı miktarı gerektiren çimento olarak bulunmuştur.

CEM III/B 32,5 N (B) çimentosunun en yüksek alkali miktarına sahip olmasına rağmen daha fazla miktarda katkı gerektirmesi ise 2.4.1’de belirtildiği üzere içeriğinde yüksek miktarda cüruf bulmasına bağlanmıştır.

Katkıların kimyasal esaslarının katkı miktarına etkisi Bölüm 3’te yapılan deneysel çalışmada köpük indeksi deneyi ile incelenmiştir. Bu çalışmada hava sürükleyici katkı miktarına katkı kimyasının etkisi, çimento tipi ve uçucu kül kullanımıyla beraber araştırılmıştır. Köpük indeksi deneyi katkının betonda kullanım miktarını belirlemek amacıyla kullanılmakta olduğundan katkı performanslarının karşılaştırıldığı durumlarda katkıların içerdikleri katı madde miktarları önemlidir. Köpük indeksi değerlerinin katkıların katı madde miktarları ile çarpılarak oluşturulan değerleri Şekil 4.8’de verilmektedir.



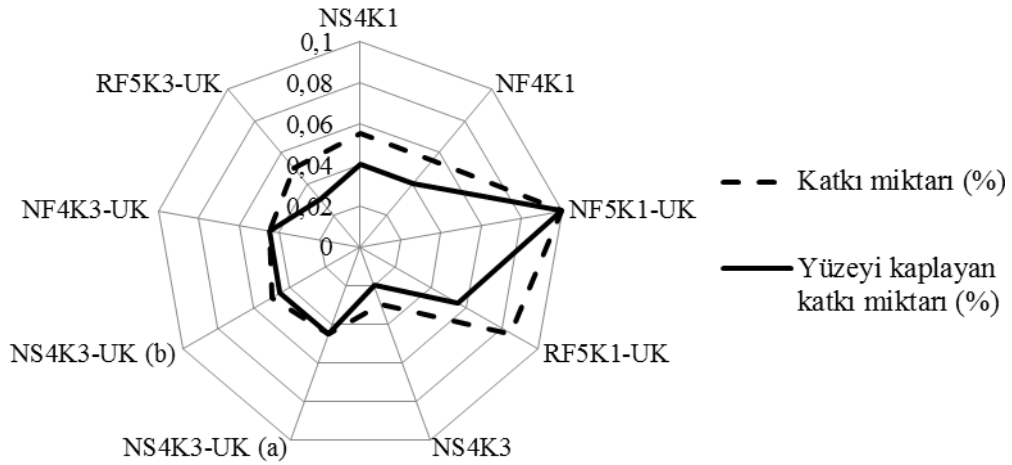
Şekil 4.8 : Katı madde miktarına göre köpük indeksi deney sonuçları.

Katkıların katı madde miktarının dikkate alınmadığı Şekil 4.7’de sentetik esaslı 6 numaralı hava sürükleyici katkının kullanım miktarı bakımından diğer katkılara kıyasla daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Buna karşın, katkıların katı madde miktarının dikkate alındığı Şekil 4.8’de sentetik esaslı katkının bu üstünlüğü ortadan kalkmıştır.

Köpük indeksi deneyi ile hava sürükleyici katkıların beton performansları belirlenmiştir. Köpük indeksi deneyi sonuçlarından reçine esaslı hava sürükleyici

katkılardan diğer katkılara kıyasla daha fazla miktarda kullanılması gerektiği görülmüştür.

Betonlar üzerinde yapılan araştırmalarda bazı karışımlarda katkı miktarları araştırmanın amacına göre farklı miktarlarda kullanılmıştır. Dolayısıyla bu betonlarda hava miktarları düşük veya yüksek değerlerde elde edilmişlerdir. Hava miktarları % 4 - 6 arasında olan betonlar üzerinde kullanılan katkı miktarı ile köpük indeksi deneyinde yüzeyin kaplandığı durumdaki katkı miktarı arasındaki ilişki Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

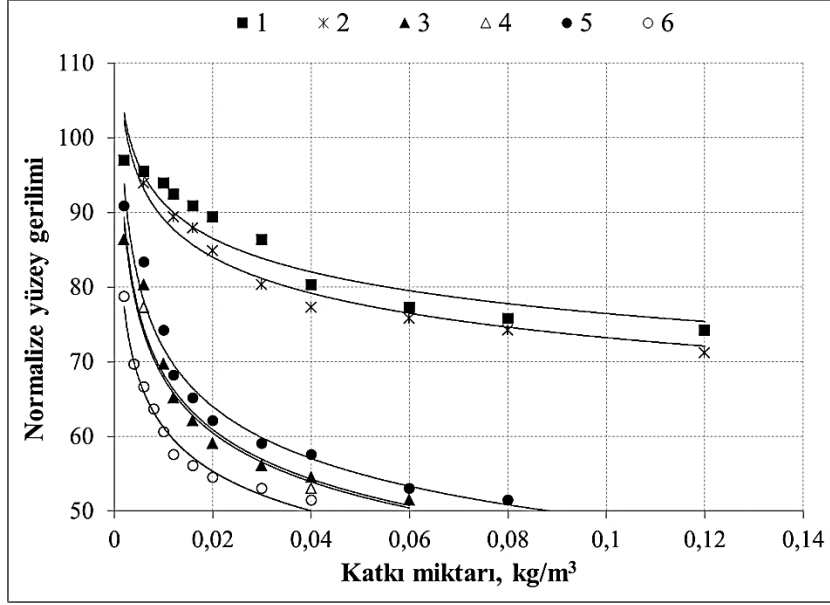


Şekil 4.9 : Betonlar üzerinde kullanılan katkı miktarı ile köpük indeksi deneyinde yüzeyin kaplandığı durumdaki katkı miktarı arasındaki ilişki.

Köpük indeksi deneyinde yüzeyi kaplayan katkı miktarları ile betonlarda % 4 - 6 arasında hava oluşturan katkı miktarları arasında yakın ilişki olduğu elde görülmüştür. NF4K1 kodlu karışımda beton tasarımından, R tipi çimentonun kullanıldığı betonlarda ise yüksek plastik viskoziteden kaynaklı nedenlerle katkı miktarları normalden fazla kullanılmıştır. Katkı miktarları arasındaki bu farklılıkların nedenleri beton deneyleri kısmında tartışılmıştır.

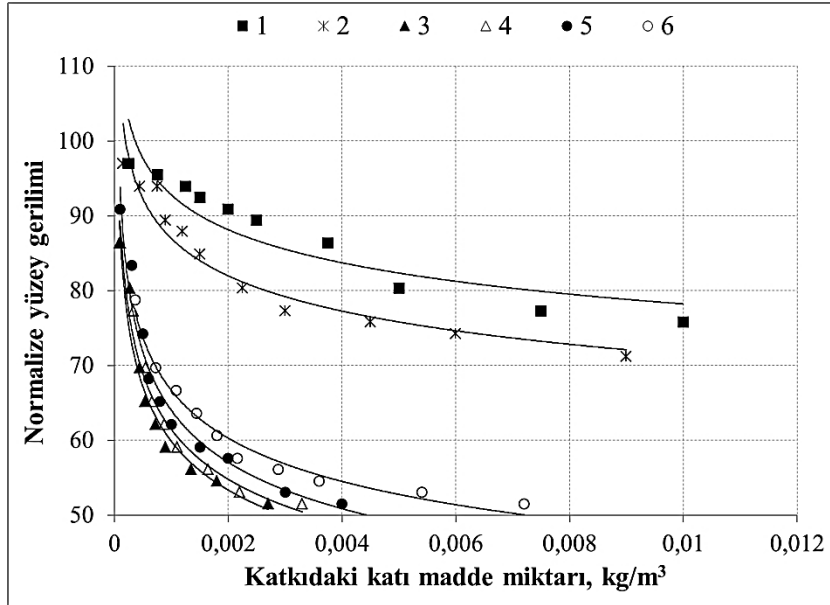
4.3.5.2 Yüzey gerilimi deneyi

Çalışma kapsamında kullanılan tüm hava sürükleyici katkıları yüzey gerilimi üzerinde etkili olmuşlar ve belirli bir notaya kadar düşürmüşlerdir. Yüzey gerilimi ölçümleri sonucu çimento tipinin ve uçucu kül kullanımının belirgin bir etkisi görülmemiştir. Ölçümler sonucu elde edilen ve Çizelge 4.9'da verilen yüzey gerilimi aralıklarının ortalama değerleri alınarak çizilen normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.10 : Normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi.

Yüzey gerilimi ölçüm sonuçlarında köpük indeksi deneyinde elde edildiği gibi en yüksek katı madde miktarına sahip olan sentetik esaslı (6 nolu) katkının daha etkili olduğu görülmüştür. Katkıların katı madde miktarlarının dikkate alınarak yüzey gerilimi üzerindeki etkilerinin incelendiği grafik Şekil 4.11’de verilmektedir.



Şekil 4.11 : Katı madde miktarına göre normalize yüzey geriliminin katkı miktarı ile değişimi.

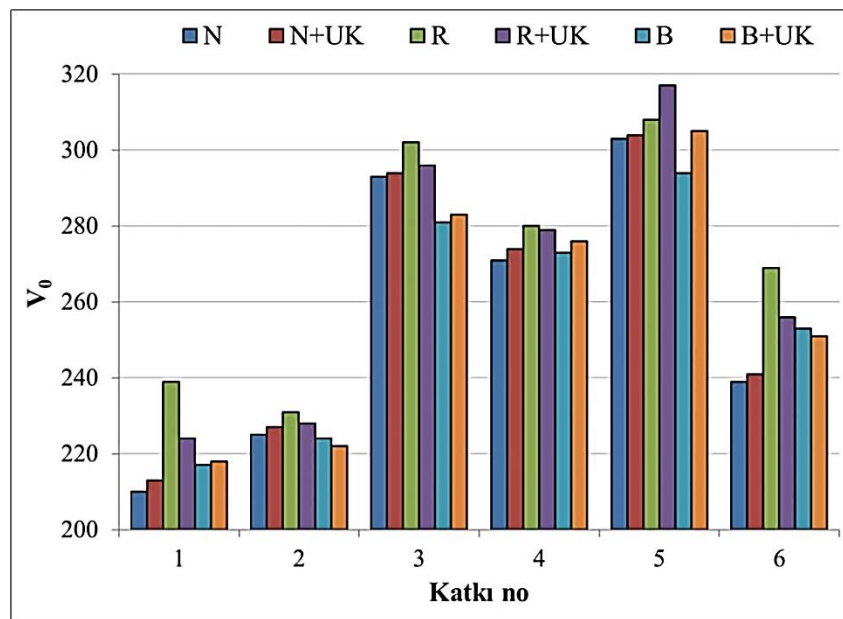
Katkıların katı madde miktarlarını dikkate alarak elde edilen Şekil 4.10’daki sentetik esaslı katkının üstünlüğü ortadan kalkmıştır. Reçine esaslı (1 ve 2) katkıları köpük indeksi deneyinde diğer katkılara kıyasla daha fazla miktarda kullanılırken, yüzey

gerilimini de diğer katkılara kıyasla daha az düşürmüşlerdir. Bu sonuç farklı bir çimentonun kullanıldığı Bölüm 3'te elde edilen yüzey gerilimi sonuçları ile uyumludur. Yüzey gerilimi sonuçları beraber değerlendirildiğinde 4 farklı çimento ve uçucu kül ile elde edilen süpernatantlar üzerinde yapılan yüzey gerilimi sonuçlarında belirgin farklılıklar elde edilmemiştir. Buna neden olarak hazırlanan süpernatantta çimentodaki suda çözünen benzer tuzların, sodyum ve potasyum hidroksitlerin bulunması ve bunun sonucunda da ölçümler arasında çok az farklılık oluşması düşünülmektedir. Bu durumda yüzey gerilimi ölçümlerini süpernatant yerine, çimento tipi ve uçucu kül etkilerinin belirlenebildiği köpük indeksi deneyindeki gibi bir ortamda yapmak gerekmektedir. Bu durumda yüzey gerilimi ölçümleri, hassas bir yöntem olan Du Nouy halkası yerine Wilhelmy plakası yöntemi ile yapılabilir.

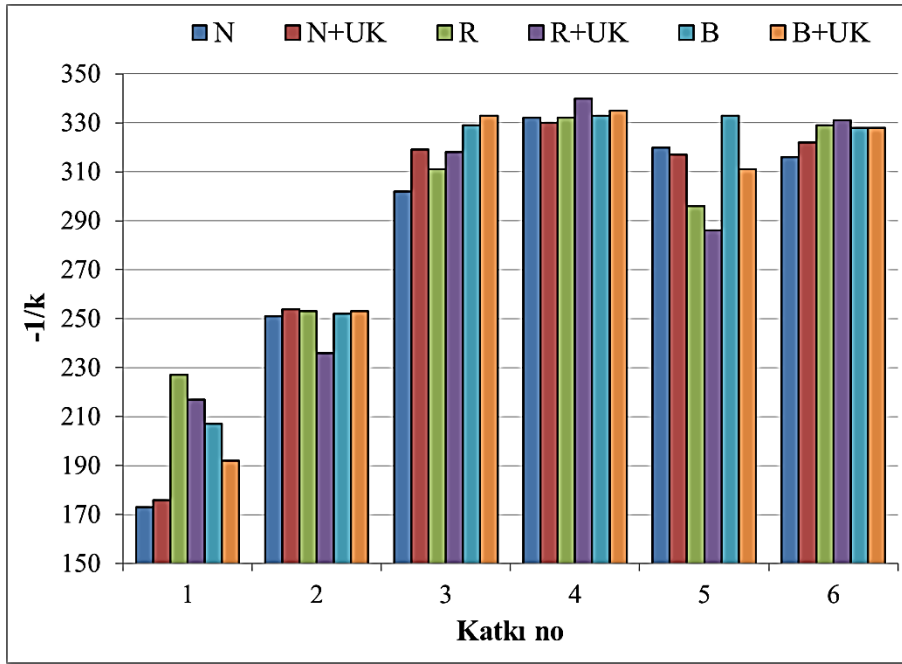
Betonlar üzerinde yapılan deneylerde %4-6 arasında hava miktarına sahip betonlarda yüzey gerilimini reçine esaslı (1 nolu) katkının 56 mN/m ve yağ alkolü esaslı (3 nolu) katkının 40 mN/m değerlerinden daha düşük değerlere düşüren katkı miktarlarında elde edilmiştir.

4.3.5.3 Köpük drenajı deneyi

Köpük drenajı deneyi sonuçları kullanılarak hesaplanan V_0 ve $-1/k$ değerlerinin hava sürükleyici katkının kimyasal esasına, çimento tipine ve uçucu kül kullanımına göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.12 : Köpük drenajı deneyi sonucu hesaplanan V_0 değerleri.



Şekil 4.13 : Köpük drenajı deneyi sonucu hesaplanan $-1/k$ değerleri.

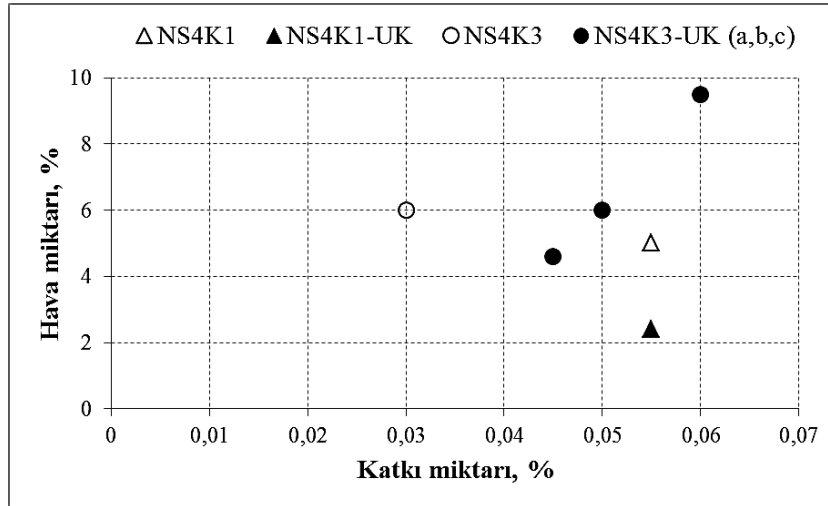
Köpük drenajı deney sonuçlarından yüzey gerilimi ölçümlerinde olduğu gibi çimento tipinin ve uçucu kül kullanımının etkisi belirgin değildir. Bununla birlikte CEM I 42,5R tipi çimentonun (R) kullanıldığı deneylerde tüm hava sürükleyici katkılarda V_0 değeri daha yüksek çıkmıştır. Taylor ve diğ. (2006), V_0 değeri yükseldikçe ve $-1/k$ değeri düştükçe daha az kararlı hava boşlukları oluştuğunu belirtmiştir. Bu değerlendirmeye göre R tipi çimentonun daha kararsız hava boşlukları oluşturduğu söylenebilir.

Reçine esaslı (1 ve 2) katkıların köpük drenajı deneyi sonucu elde edilen parametreleri diğer katkılardan daha farklıdır bu sonuç Bölüm 3'te farklı bir çimento üzerinde yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir.

Betonlar üzerinde yapılan deneylerde hava boşluklarının kararlılığının hava sürükleyici katkı kimyasından önce başka nedenlere bağlı olduğu bununla birlikte reçine esaslı 1 numaralı katkının yağ alkolü esaslı 3 numaralı katkıya kıyasla daha kararlı hava boşlukları oluşturduğu görülmüştür. Betonlarda hava boşluklarının kararlılığı üzerindeki etkenler taze beton deney sonuçlarının değerlendirilmesi kısmında tartışılmıştır.

4.3.5.4 Taze beton deneyleri

Taze betonlar üzerinde çökme, hava miktarı ölçümü ve beton reometresi ile reoloji ölçümleri yapılmıştır. Uçucu kül kullanımının hava sürüklenme üzerindeki etkisinin incelendiği 1. aşama deney sonuçları Şekil 4.14'te verilmektedir.



Şekil 4.14 : Uçucu kül kullanımının hava sürüklenme üzerindeki etkisi.

Reçine esaslı 1 numaralı katkının kullanıldığı betonlarda eşit katkı miktarında uçucu kül kullanımıyla hava miktarının azaldığı görülmüştür. Yağ alkolü esaslı 3 numaralı katkının kullanıldığı uçucu küllü betonlarda katkı miktarının arttırılmasıyla hava miktarının arttığı ve uçucu kül içermeyen betonla eşit hava miktarı için daha fazla miktarda katkı kullanılması gerektiği görülmüştür.

Yapılan çalışmalar sonucunda uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkı dozajını katkının kimyasal esasından bağımsız olarak arttırdığı belirlenmiştir. Bu sonuç, farklı hava sürükleyicilerin de kullanıldığı köpük indeksi sonuçları ile uyumludur.

Beton kıvamının hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı betonların çökme ve çökmede-yayılma deneylerine ait resimler Şekil 4.15'te gösterilmektedir. F4 kıvam sınıfında uçucu kül kullanılmadan üretilen betonda ince malzeme miktarı yetersiz kalmış ve bunun sonucunda çimento hamuru agregalarla birlikte yayılmamış ve orta bölgede toplanmıştır.



S4



F4

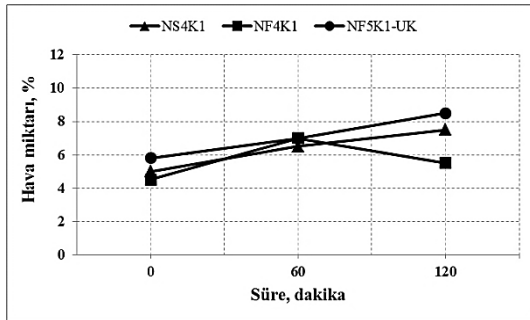


F5-UK

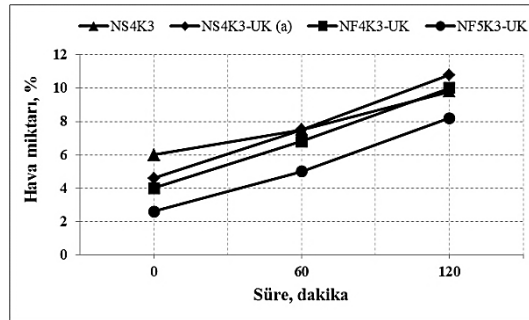


Şekil 4.15 : Çökme ve çökmede-yayılma deneylerine ait fotoğraflar.

Beton kıvamının hava sürüklenme üzerine etkisinin araştırıldığı 2. aşamada üretilen betonlara ve diğer aşamalarda bu aşamadaki çalışmayı destekleyecek kıvam deneylerinin yapıldığı betonlara ait sonuçlar Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmektedir.



1 nolu katkı ile üretilen betonlar



3 nolu katkı ile üretilen betonlar

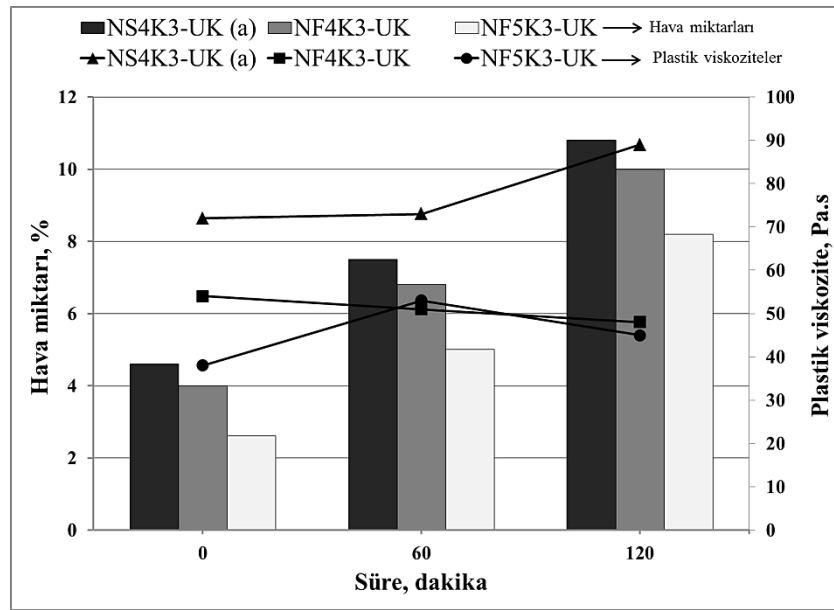
Şekil 4.16 : Betonların hava miktarının zamanla değişimi.

Betonların hava miktarının, beton kıvamından ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olarak zamanla arttığı görülmüştür. NF4K1 kodlu karışımda ise

120 dakika sonunda hava miktarı düşmüştür. Bunun nedeni Şekil 4.14'te görüleceği üzere beton tasarımından kaynaklanmıştır. F4 kıvamında uçucu kül kullanılarak ince malzeme miktarının arttırıldığı ve tasarımın düzeltildiği karışımda ise 120 dakika sonunda hava miktarı düşmemiş ve diğer karışımlarda olduğu gibi artmıştır.

Hava miktarlarındaki zamanla artış beklenen bir durum olmayıp uçucu kül kullanımından bağımsızdır. Hava miktarındaki artış, reçine esaslı katkıının (1 nolu) kullanıldığı betonlarda % 2,5-3 iken, yağ alkolü esaslı (3 nolu) katkıının kullanıldığı betonlarda % 6'ya varmıştır.

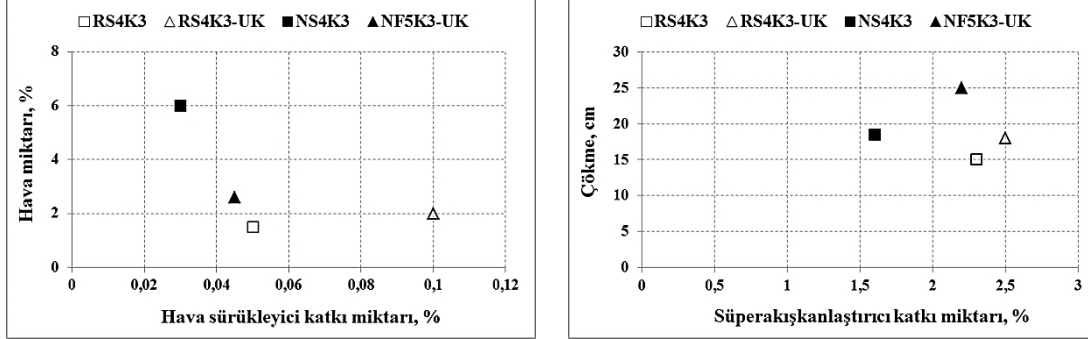
Hava miktarının plastik viskozite değerleri ile birlikte zamana göre değişimi kullanılan hava sürükleyici katkı miktarları aynı, fakat kıvamları farklı olan CEM I 42,5 N tipi çimentonun, kararlılığı daha az olduğu görülen 3 numaralı katkıının ve uçucu külün kullanıldığı betonlarda araştırılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.17 : Hava miktarının plastik viskozite ve zamanla değişimi.

Aynı katkı miktarına sahip betonlarda farklı hava miktarları elde edilmiştir. Bunun nedeni, beton kıvamlarının farklı olmasından kaynaklanabilir. Betonlar üretildikten sonra yapılan hava miktarı ölçümlerinde kıvamın azalması yani plastik viskozite değerlerinin düşmesi ile birlikte elde edilen hava miktarları azalmıştır. Buna neden olarak kıvamın azalmasıyla hava boşluklarının birleşerek veya doğrudan betonu terk etmesi düşünülmektedir. Bununla birlikte, kıvamdan bağımsız olarak 60 ve 120 dakika sonunda yapılan ölçümlerde her 3 karışımda da hava miktarları yaklaşık % 3 artmıştır.

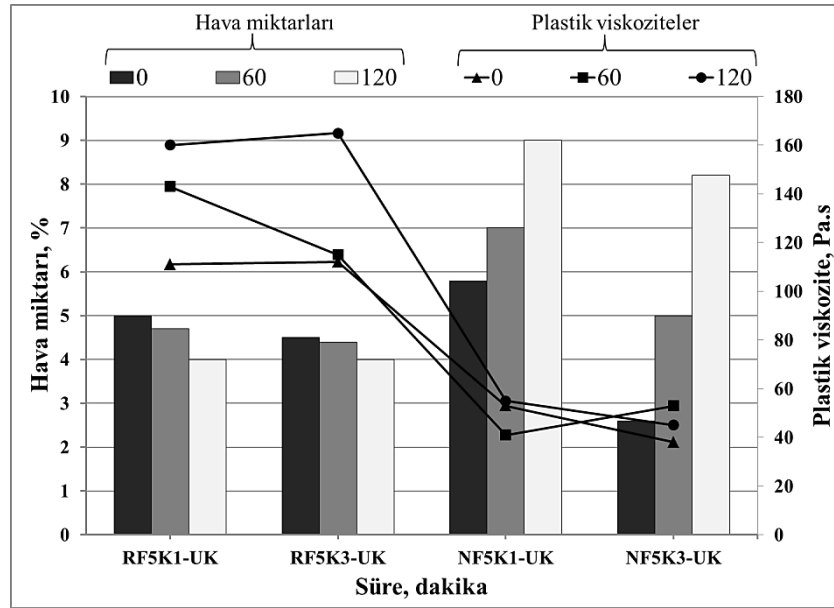
Çimento tipinin hava sürüklemeye etkisinin araştırıldığı üçüncü aşamada modifiye fosfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı ile üretilen betonlara ait deney sonuçları diğer aşamalardaki bazı betonların sonuçları ile birlikte Şekil 4.18’de verilmektedir.



Şekil 4.18 : R tipi çimento ve modifiye fosfonat esaslı SA kullanılan betonlar.

CEM I 42,5 R tipi çimento, yağ alkolü esaslı 3 numaralı hava sürükleyici katkı ve modifiye fosfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı özellikte katkının kullanıldığı betonlara hava sürüklenememiş, hava sürükleyici katkı miktarları CEM I 42,5 N tipi çimentonun kullanıldığı karışımlara kıyasla arttırılmasına rağmen hava miktarı artmamıştır. Benzer biçimde, çökme değerleri de süperakışkanlatırıcı katkı miktarı arttırılmasına karşın N tipi çimentonun kullanıldığı karışımlara kıyasla daha düşük çıkmıştır. Hava sürükleme ve kıvam arttırmadaki güçlüklerin nedeni olarak çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkının uyumsuzluğu öngörülerek modifiye fosfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı yerine polikarboksilik eter esaslı bir süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak, önceki aşamalarda hava boşluklarının en kararsız olduğu uçucu külün kullanıldığı ve F5 kıvamındaki betonlarda her iki hava sürükleyici katkı kullanılarak betonlar üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.19’da gösterilmektedir.

Polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlatırıcı katkının kullanılmasıyla CEM I 42,5 R tipi çimentolu betonlarda her iki hava sürükleyici katkı ile de hava sürüklenebilmiştir. Elde edilen betonların hava boşluklarının kararlılığı N tipi çimentonun modifiye fosfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı ile kullanıldığı betonlarınkine kıyasla çok daha kararlıdır ve zamanla viskozitenin artmasıyla azalmıştır.



Şekil 4.19 : R ve N tipi çimentolu betonların hava miktarları ve plastik viskozitelerinin zamanla değişimi.

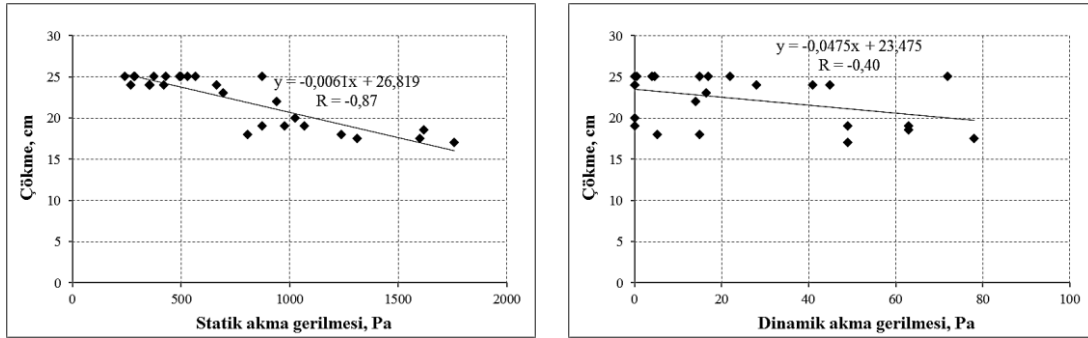
Polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı katkının kullanılmasıyla aynı kıvam sınıfında (F5) fakat plastik viskozitesi daha yüksek betonlar elde edilmiştir. Çimento inceliklerinin eşit olduğu göz önüne alındığında diğer tüm bileşenleri aynı olan bu betonlarda viskozitenin artmasının nedeninin süperakışkanlaştırıcı katkı olduğu düşünülebilir. Bu kıvam sınıfında (F5) viskozitenin artması hava boşluklarının kararlılıkları üzerinde de etkili olmuş olabilir. Bununla beraber, RF5K1-UK ve RF5K3-UK betonlarının plastik viskozite değerlerine yakın değerlere sahip olan NS4K1 ve NS4K3 betonlarında viskozitenin yüksek olmasına rağmen kararlı hava boşlukları elde edilememiştir.

R tipi çimentonun kullanıldığı betonların kıvamının yani viskozitesinin zamanla artmasıyla hava miktarları düşmüştür. Buna neden olarak bazı hava boşluklarının daha rijit ortam içinde yok olması düşünülmektedir. Beton kıvamının hava sürüklemeye etkisinin incelendiği ikinci aşamada yapılan deneylerin sonucunda ise, beton kıvamının (S4, F4, F5) azalmasıyla hava miktarlarının düştüğü görülmüştü (Şekil 4.16). Bununla birlikte, bu betonlarının plastik viskozitesinin zamanla belirgin olarak değişmediği de görülmüştü.

Reolojik özelliklerin incelenmesi:

Çalışma kapsamında beton reometresi kullanılarak yapılan reoloji deneyleri sonucu hesaplanan reoloji modellerine ait parametreler, üretilen betonlara ait özellikler ile ilişkilendirilerek incelenmiştir.

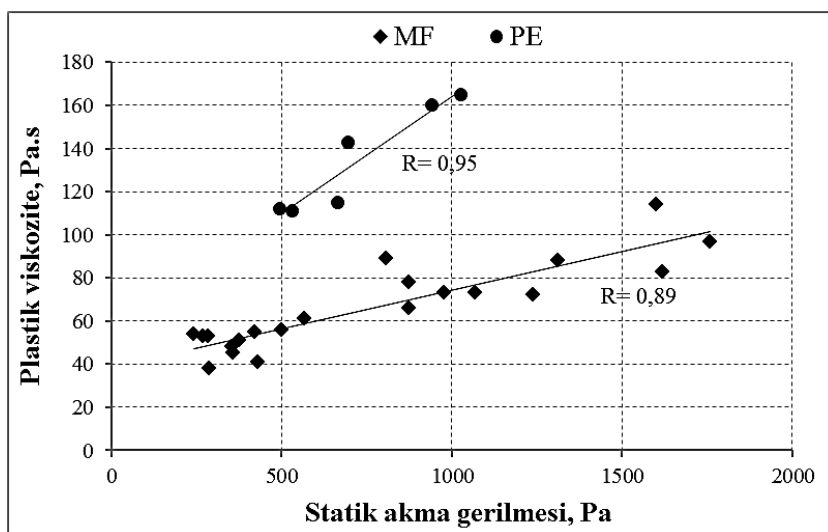
Çökme değerinin statik ve dinamik akma gerilmeleri ile değişimi Şekil 4.20’de verilmektedir.



Şekil 4.20 : Çökmenin statik ve dinamik akma gerilmeleri ile değişimi.

Reometre ölçümleri 9 beton karışımında ve 3 farklı zamanda yapılmıştır. Çökmenin statik akma gerilmesi ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Dinamik akma gerilmesinin zamandan ve uçucu kül kullanımından daha fazla etkilendiği düşünülmektedir.

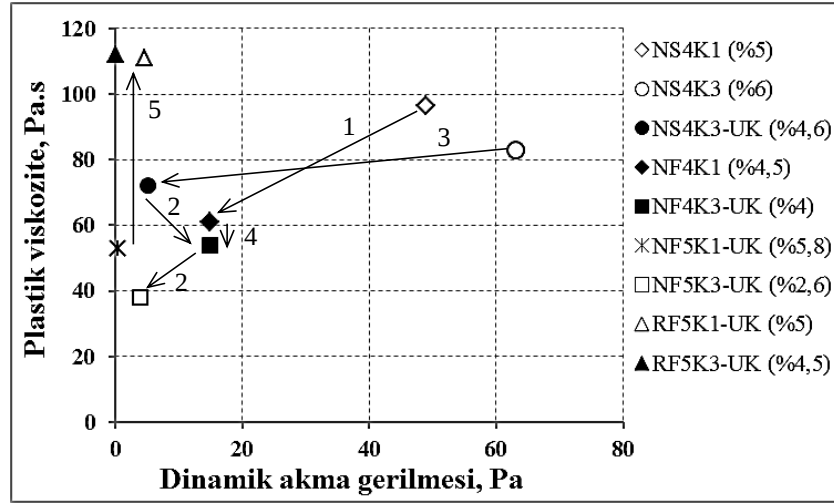
Plastik viskozite ve statik akma gerilmesi arasındaki ilişki Şekil 4.21’de verilmektedir.



Şekil 4.21 : Plastik viskozite ve statik akma gerilmesi arasındaki ilişki.

Bingham modeli parametresi olarak elde edilen plastik viskozite ve reometre pervanesinin beton içinde sabit düşük bir hızla döndürülmesi (0,025 devir/saniye) ile elde edilen statik akma gerilmesi arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki elde edilmiştir. Polikarboksilik eter (PE) esaslı süperakışkanlaştırıcı katkının kullanıldığı betonlarda, modifiye fosfonat esaslı katkının kullanıldığı betonlara kıyasla, plastik viskozite değerleri yüksek olmasına rağmen statik akma gerilmesi değerleri daha düşüktür.

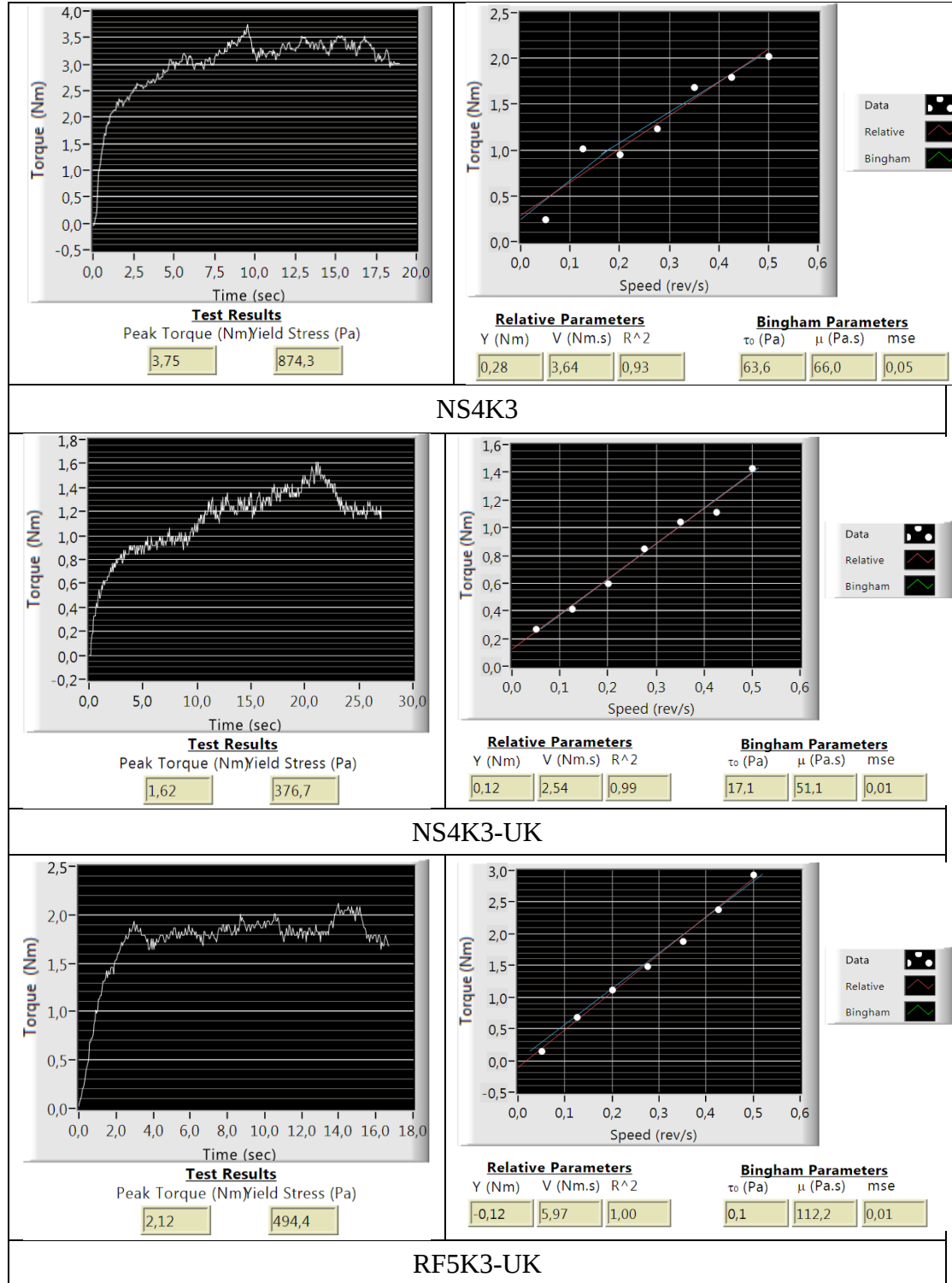
Beton karışımlarına ait Bingham modeli parametreleri Şekil 4.22’de verilmektedir. Şekilde sadece betonlar üretildikten hemen sonra yapılan reometre ölçümlerine ait sonuçlar sunulmuştur. Betonlara ait hava miktarları, kodların yanında parantez içinde verilmiştir.



Şekil 4.22 : Beton karışımlarına ait Bingham modeli parametreleri.

Şekil 4.22’de; 1 ve 2 nolu oklarla sırasıyla yüksek kıvamlı betonda SA katkısının artırılmasının hem plastik viskoziteyi hem de dinamik akma gerilmesini düşürdüğü, düşük kıvamlı betonda ise plastik viskoziteyi düşürürken dinamik akma gerilmesine belirgin bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir. 3 ve 4 nolu oklarla sırasıyla yüksek kıvamlı betonda UK kullanımının artırılmasının özellikle dinamik akma gerilmesini düşürdüğü, düşük kıvamlı betonda ise hem plastik viskoziteye hem de dinamik akma gerilmesine belirgin bir etkisinin olmadığı işaretlenmiştir. 5 nolu okla PE esaslı SA kullanımıyla eşit dinamik akma gerilmesine sahip fakat daha yüksek plastik viskoziteli betonlar elde edildiği gösterilmiştir.

Bazı karışımlara ait statik akma gerilmesi ve Bingham modeli parametrelerinin elde edildiği grafikler Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : Statik akma gerilmesi ve Bingham modeli parametreleri grafikleri.

4.3.6 İrdeleme ve değerdendirme

Son yıllarda özellikle kendiliğinden yerleşen betonlarda hava boşluğu sistemi kararlılığı konusunda bu bölümde sunulan çalışma ile benzer amaçlara sahip araştırma sayısı artmıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular bu araştırmaların sonuçları ile birlikte aşağıda değerdendirilmiştir. Böylece çalışmanın literatürdeki yeri aydınlatılmıştır.

Khayat ve Assaad (2002), kendiliğinden yerleşen betonlarda hava boşluğu kararlılığını arttırmada öncelikli olarak çimento esaslı malzeme miktarının artırılmasını ve S/Ç oranının düşürülmesini önermişler, alternatif olarak viskozite artırıcı katkı kullanılmasını amaçlamışlardır. Ayrıca, çalışmalarında reoloji ölçümleri yaparak küçük hava boşluklarının birleşmesinin önleneyeği plastik viskozite ve akma dayanımlarına ait sınır değerdeler belirlemişlerdir. Sunulan bu çalışmada ise, hava boşluğu kararlılığı beton bileşen miktarları veya bileşim oranları ile değerdil doğrudan boşlukları oluşturan katkının kimyası ele alınmış ve reçine esaslı katkıların bu konudaki üstünlükleri belirlenmiştir. Ayrıca, reoloji ölçümleri de yapılarak reolojik parametrelerin etkileri de gösterilmiştir.

Barfield ve Ghafoori (2012), kendiliğinden yerleşen betonların kıvamının hava boşluğu oluşumu ve kararlılığını etkilediğini taze beton deneyleri ile belirlemişlerdir. Çalışmalarında dört farklı hava sürükleyici katkı kullanmışlar ve sentetik esaslı katkının kararlılığının beton kıvamından daha fazla etkilendiğini göstermişlerdir. Bununla birlikte herhangi bir neden öne sürmemişlerdir. Bu çalışma kapsamında da beton kıvamının hava boşluğu sistemi kararlılığına etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca, reçine esaslı katkının daha kararlı olması tezin diğer bölümlerinde de yapılan yüzey gerilimi ölçümleri ile ilişkilendirilmiştir.

Lazniewska-Piekarczyk (2012), kendiliğinden yerleşen betonlarda yüksek hava miktarını, köpük engelleyici katkıların (anti foaming agent) etkili biçimde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, hava boşluğu analizleri yaparak köpük engelleyici katkıların hava miktarını düşürürken hava boşluğu sistemi parametrelerini de olumsuz etkilediğini belirlemiş buna rağmen kendiliğinden yerleşen betonun donma-çözülme dayanıklılığı sağladığını göstermiştir. Araştırmacı daha sonraki çalışmasında ise (Lazniewska-Piekarczyk, 2013), yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonların donma-çözülme dayanıklılığı sağlaması için oluşması gereken hava

boşluğu sistemi üzerinde hava sürükleyici ve kıvam arttırıcı katkıların tipinin etkisini araştırmıştır. Sentetik kopilimer esaslı kıvam arttırıcı katkının hava miktarını olumsuz etkilediğini belirlemiştir. Sentetik esaslı hava sürükleyici katkının küçük boyutlu boşluklar oluşturmaya karşı yeterli donma-çözülme performansını sağladığını göstermiştir. Sunulan bu çalışmada ise katkı kimyasının boşluk oluşumu ve kararlılığının yanında bir hava sürükleyici katkının betonda kullanılmadan önce değerlendirilmesine odaklanılmıştır.

Taylor ve diğ., (2006) çalışmalarında köpük drenajı yöntemini farklı katkıların ve çimento esaslı malzemelerin etkilerinin belirlenmesinde yöntem olarak önermişler. Bununla birlikte, deney ve uygulama arasında uyumsuzluklar yaşanabildiğini ve betonlar üzerindeki çalışmaların sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada köpük drenajı deneyi 3 farklı çimento ve bunlara uçucu kül eklenmesiyle yapılmış ve sonuçları beton deneyleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, Taylor ve diğerlerinin kararlı katkılar için önerdiklere değerlere sahip reçine esaslı katkıların daha kararlı boşluklar oluşturduğu belirlenmiştir.

4.3.7 Sonuçlar

Çalışma kapsamında bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- 1) Betonlarda kullanılacak katkı miktarları köpük indeksi deneyi ve yüzey gerilimi ölçümleri ile belirlenebilmiştir.
- 2) Farklı çimento ve uçucu kül kullanımının etkisi yüzey gerilimi ölçümleri ile belirlenememiştir. Bununla birlikte, yeterli hava boşluğu sistemi oluşturacak katkı miktarı için hava sürükleyici katkı kimyasına bağlı olarak sınır değerler elde edilmiştir. %4-6 arasında hava miktarına sahip betonlarda yüzey gerilimini reçine esaslı (1 nolu) katkının 56 mN/m ve yağ alkolü esaslı (3 nolu) katkının 40 mN/m değerlerinden daha düşük değerlere düşüren katkı miktarlarında elde edilmiştir.
- 3) Farklı çimento ve uçucu kül kullanımının etkisi köpük indeksi deneyleri ile belirlenebilmiştir. Bununla birlikte beton ölçeğinde, diğer beton bileşenlerinin uyumsuzluğundan kaynaklanan bazı beklenmeyen sonuçlar da elde edilmiştir.
- 4) Köpük drenajı deneyinde de yüzey gerilimi ölçümlerinde olduğu gibi farklı çimento ve uçucu kül kullanımının etkisi belirgin olmamıştır. Bununla birlikte,

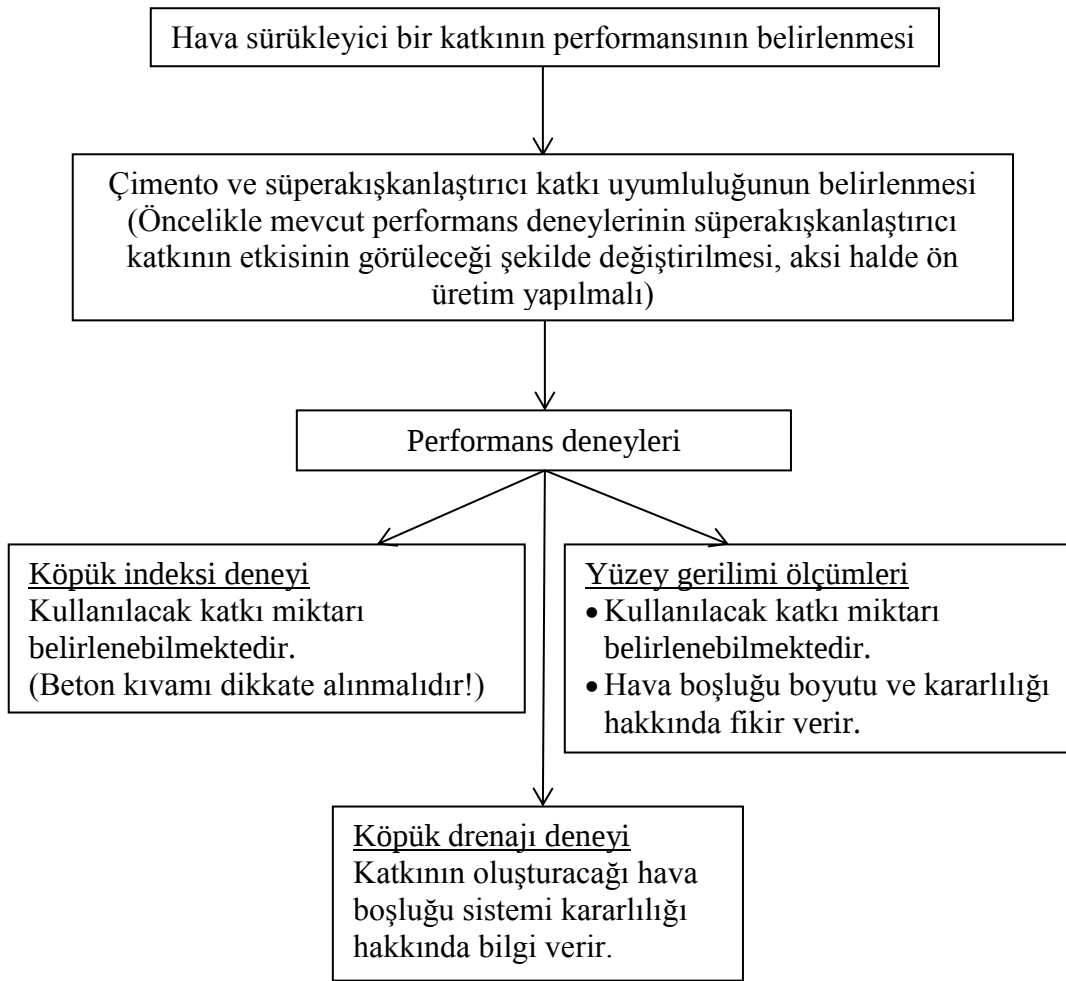
katkıların kimyasal esaslarından kaynaklanan farklılıklar belirlenmiştir. Betonlar üzerinde yapılan deneylerde ise hava boşluklarının kararlılığının hava sürükleyici katkı kimyası yanında çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumsuzluğu ve beton kıvamı gibi nedenlere bağlı olduğu görülmüştür.

- 5) Betonlar üzerinde yapılan deneylerde, uçucu kül kullanımının katkı miktarını hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olarak arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte uçucu kül kullanımının boşlukların kararlılıkları üzerinde olumsuz etkisi görülmemiştir.
- 6) Betonların hava miktarının, beton kıvamından, uçucu kül kullanımından ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olarak zamanla arttığı görülmüştür. Sonraki aşamada yapılan deneylerde, bu artışın nedeninin kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı olduğu belirlenmiştir. Hava miktarındaki artış, reçine esaslı katkının (1 nolu) kullanıldığı betonlarda % 2,5-3 iken, yağ alkolü esaslı (3 nolu) katkının kullanıldığı betonlarda % 6'ya çıkmıştır.
- 7) Beton bileşimlerinde sadece süperakışkanlaştırıcı katkı miktarının değiştirilmesi ile elde edilen farklı kıvamlarda, hava sürükleyici katkı miktarı aynı olmasına karşın farklı hava miktarları elde edilmiştir. Betonlar üretildikten sonra yapılan hava miktarı ölçümlerinde kıvamın azalması yani plastik viskozite değerlerinin düşmesi ile birlikte elde edilen hava miktarları azalmıştır. Buna neden olarak kıvamın azalmasıyla hava boşluklarının birleşerek veya doğrudan betonu terk etmesi düşünülmektedir. Bununla birlikte, kıvamdan bağımsız olarak 60 ve 120 dakika sonunda yapılan ölçümlerde her 3 karışımda da hava miktarları yaklaşık % 3 artmıştır.
- 8) Betonların kıvamının yani viskozitesinin zamanla arttığı karışımlarda hava miktarları zamanla düşmüştür. Bu durumun nedeni, bazı hava boşluklarının daha rijit ortam içinde zamanla yok olması olabilir.
- 9) Farklı çimentolar üzerinde yapılan deneylerde, hava miktarının kararsızlığının çimento-süperakışkanlaştırıcı katkı uyumsuzluğundan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Farklı bir süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmasıyla hava sürükleyici katkı kimyasından bağımsız olarak, kararlı hava boşlukları elde edilmiştir.

İleri çalışmalar ve öneriler:

Hava sürükleyici katkıların beton performanslarının belirlendiği ön deneylerde, beton bileşenlerinin uyumsuzluğundan veya beton tasarımından kaynaklı bazı beklenmeyen sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle, ön deneylerde süperakışkanlaştırıcı katkının kullanılması ve böylece çimento-süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunun da dikkate alınması gerektiği anlaşılmıştır.

Bu sonuçlardan sonra hava sürükleyici bir katkının betonda kullanılmadan önce performansının belirlenmesine yönelik yapılacaklar ve elde edilecek bilgiler aşağıdaki şemada sunulmaktadır.



Şekil 4.24 : Hava sürükleyici katkıların değerlendirilmesine yönelik akış şeması.

5. HAVA BOŞLUĞU SİSTEMİ PARAMETRELERİNİN BETONLARIN DONMA-ÇÖZÜLME DAYANIKLILIĞI, MEKANİK, İLETKENLİK VE GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

5.1 Giriş

Bölüm 3'te de belirtildiği üzere hava sürükleyici katkıları kimyasal esaslarına göre farklı boyutlarda hava boşlukları ve buna bağlı olarak farklı hava boşluğu sistemleri oluşturmaktadırlar. Mielenz (1968) ve Chatterji (1986) çalışmalarında farklı hava sürükleyici katkıları ile farklı hava boşluğu sistemleri elde etmişlerdir. Krejier (1967) farklı hava sürükleyici katkıların donma-çözülme performanslarını incelediği bir çalışmada hava miktarı % 5 olmasına rağmen, hava sürükleyici olarak Fenol etoksilat kullanılan betonlarda gerekli donma-çözülme dayanıklılığı sağlanamadığını belirtmiştir (Çizelge 5.1). Buna neden olarak, kuyruk kısımları hidrofobik olan katkıların oluşturdukları hava boşluklarının deney öncesi su ile dolmadığı buna karşın hidrofobik olmayan moleküllerden oluşan fenol etoksilat'ın oluşturduğu hava boşlukları içine deney öncesi su girişinin olması nedeniyle donmanın başlaması ile bu betonların hasara uğraması gösterilmiştir (Scherer ve diğ., 2003).

Çizelge 5.1 : Farklı hava sürükleyici katkıların donma-çözülme performansları (Kreijer, 1967).

Katkı	Hava miktarı (%)	Donma-çözülme dayanımının bağlı sınıflandırması*
Sodyum oleat	5,6	86
Sodyum lauril sülfat	5,8	46
Ağaç reçinesi	5,2	57
Fenol etoksilat	5,2	7
Katkısız	2,0	5

*Donma-çözülme çevrimleri sonucu, çeşitli tekniklerle yapılan elastisite modülü ve basınç dayanımlarının ortalaması olup düşük olması hasar olduğunu göstermektedir.

Hava boşluğu sistemi parametreleri olan hava miktarı, aralık faktörü ve özgül yüzey Bölüm 2'de tanımlanmıştır. Bu parametrelerin özellikle donma-çözülme

dayanıklılığı üzerindeki etkileri çok önemli olmakla beraber betonların diğer özellikleri üzerinde de etkileri bulunmaktadır. Birçok çalışmada yeterli donma-çözülme dayanıklılığı için gerekli hava boşluğu sistemi parametreleri belirlenmeye çalışılmış, şartnamelerde ve standartlarda çeşitli değerler istenmiştir. Genel olarak, hava miktarı için % 4-6 arasında, özgül yüzey için $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ 'ün üzerinde ve aralık faktörü için $200 \text{ }\mu\text{m}$ 'nin altında değerler yeterli donma-çözülme dayanıklılığı için gerekli görülmektedir.

EN 934-2'ye göre hava sürükleyici katkının sağlaması gereken boşluk sistemi parametreleri; hava miktarı %4-6, aralık faktörü $\leq 200 \text{ }\mu\text{m}$ 'dir. ASTM C233 ve C260' da ise bir katkının hava sürükleyici katkı sayılabilmesi için vinsol reçineli katkının en az % 80 performansını vermesi istenmektedir.

5.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı

Bu bölümde hava boşluğu sistemi parametrelerinin yanında hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının, betonların başta donma-çözülme dayanıklılığı olmak üzere, mekanik, geçirimsizlik ve iletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Böylece, hem farklı kimyasal esasa hem de farklı boşluk sistemine sahip betonlar üzerinde deneyler yapılarak literatürdeki bir boşluğun doldurulması amaçlanmıştır.

5.3 Deneysel Çalışma

5.3.1 Kullanılan malzemeler

5.3.1.1 Çimento

CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Bölüm 3'te (Çizelge 3.2) verilmektedir.

5.3.1.2 Agregalar

Doğal kum (0-4 mm) ve aynı kayacın kırılması ile elde edilen kalker esaslı, kırma kum (0-4 mm), kırma taş I (4-12 mm) ve kırma taş II (12-22 mm) agregaları kullanılmıştır. Agregalara ait elek analizi sonuçları Çizelge 5.2'de ve fiziksel özellik deney sonuçları Çizelge 5.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 5.2 : Elek analizi sonuçları.

Agrega	Elek boyutu, mm - % Geçen								
	0,063	0,25	0,5	1	2	4	8	16	22
Doğal kum	0,6	11,6	96,7	98,2	98,5	99,0	100	100	100
Kırma kum	4,1	9,5	19,1	32,6	56,4	99,1	100	100	100
Kırma taş I	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	42,1	100	100
Kırma taş II	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	22,5	100

Çizelge 5.3 : Agregalara ait fiziksel özellikler.

Agrega	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Los Angeles (LA)	Donma Çözülme (%)
	TS EN 1097-6	TS EN 1097-6	TS EN 1097-2	TS EN 1367-2
Doğal kum	2,62	1,00	-	-
Kırma kum	2,70	1,25	-	-
Kırma taş I	2,73	0,50	21	18
Kırma taş II	2,74	0,48	21	18

TS EN 12620 standardına göre Los Angeles katsayısı (LA) 21 olan kırma taş agregaları LA₂₅ sınıfına, magnezyum sülfat kullanılarak yapılan donma-çözülme deneyi sonucu kütlece ağırlık kaybı % 18 olan kırma taş agregaları MS₁₈ sınıfına girmektedir. Ayrıca, 63µm'luk elekten geçen malzeme miktarı %3'den fazla olan kırma kum agregası için metilen mavisi ve kum eşdeğeri deneyleri (TS EN 933-9) yapılmıştır. Deney sonucu metilen mavisi ve kum eşdeğeri değerleri sırasıyla 0,5 mg/g ve %72,5 olarak elde edilmiştir. TS EN 933-9'da kum eş değeri değerinin alt sınırı % 60 olarak verilmektedir. Bu değerler genelde beton üretiminde kullanılacak bir agrega için kabul edilen değerlerdir.

5.3.1.3 Hava sürükleyici katkılar

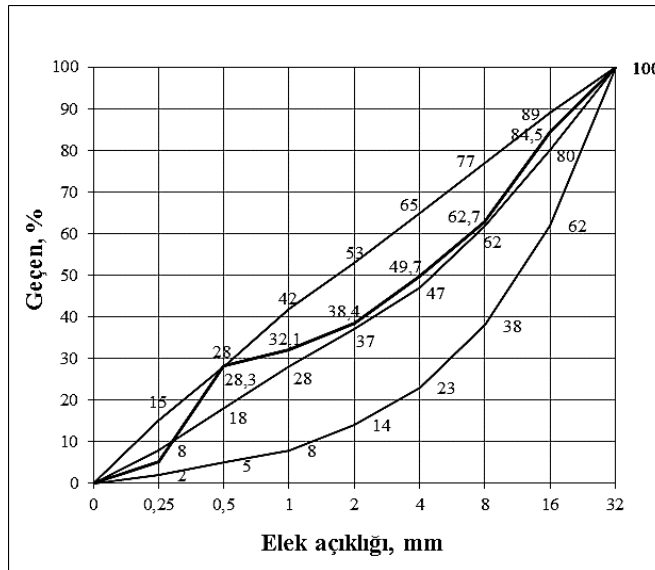
Çalışmada kullanılan hava sürükleyici katkıların tanımlamaları fiziksel özellikleri ve kodları Bölüm 3'te (Çizelge 3.4) verilmektedir. Katkılara ait FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) analizleri Ek B'de verilmektedir.

5.3.2 Beton karışımı tasarımları

Çalışma kapsamında hava sürükleyici katkıların etkileri araştırıldığından bu katkılar dışında herhangi bir kimyasal veya mineral katkı kullanılmamıştır. Su/çimento oranı TS EN 206-1’de donma-çözülme etkisi altındaki betonlarda önerilen en yüksek su/çimento değeri olan 0,55 olarak seçilmiştir. Betonun kıvamı ise aynı standartta verilen S2 (5-10 cm) çökme sınıfı seçilmiştir. Bu sınıfın altındaki kıvamlarda hava sürüklemek zorlaşmakta üstündeki kıvamlarda ise hava sürükleyici katkıların kararlılıklarının da incelenmesi gerekmektedir. Kimyasal tanımlamaları farklı olan 6 hava sürükleyici katkının 2’şer farklı miktarda kullanılmasıyla ve hava sürükleyici katkı kullanılmadan oluşturulan kontrol karışımı ile birlikte 13 adet beton tasarımı yapılmıştır.

5.3.2.1 Agrega karışım granülometrisi

Doğal kum’ un %24, kırma kum’ un %26, kırma taş I’ in %30 ve kırma taş II’ nin %20 oranında kullanılmasıyla elde edilen karışıma ait granülometri eğrisi Şekil 5.1’de sunulmaktadır.



Şekil 5.1 : Agrega karışımına ait granülometri eğrisi.

5.3.2.2 Beton bileşimi ve malzeme miktarları

Su/çimento oranı ve çimento miktarının sabit olduğu karışımlarda hava miktarı ve hava sürükleyici katkı türü ise değişmektedir. Hava sürüklenmemiş kontrol karışımı K ile gösterilmiştir. Hava sürükleyici katkı kullanılan karışımlarda ilk değer hava sürükleyici katkının numarasını, ikinci değer ise düşük (D) veya yüksek (Y) kullanım

miktarlarını göstermektedir. Örneğin, 2Y kodlu karışım 2 numaralı katkının yüksek kullanım miktarı ile oluşturulan betonu simgelemektedir. Karışım kodları ve malzeme miktarları Çizelge 5.4’te verilmektedir.

Çizelge 5.4 : Karışım kodları ve malzeme miktarları.

Karışım kodu	Çimento kg/m ^{3*}	Su kg/m ^{3*}	Doğal kum kg/m ³	Kırma kum kg/m ³	Kırma taş I kg/m ³	Kırma taş II kg/m ³	HSK kg/m ^{3**}	Hava miktarı %	Birim ağırlık kg/m ³
K	357	196	428	477	557	373	-	1,0	2388
1D	357	196	417	466	545	365	0,0219	2,5	2347
1Y	357	196	399	445	520	348	0,0598	5,5	2266
2D	357	196	417	466	545	365	0,0171	2,5	2347
2Y	357	196	386	431	503	337	0,0539	7,5	2211
3D	357	196	417	466	545	365	0,0043	2,5	2347
3Y	357	196	409	456	533	356	0,0085	4,0	2307
4D	357	196	421	470	549	367	0,0055	2,0	2361
4Y	357	196	412	459	537	359	0,0090	3,5	2320
5D	357	196	421	470	549	367	0,0057	2,0	2361
5Y	357	196	412	459	537	359	0,0095	3,5	2320
6D	357	196	417	466	545	365	0,0047	2,5	2347
6Y	357	196	409	456	533	356	0,0148	4,0	2307

*Değişen hava hacmine bağlı olarak agrega miktarı değişmekle birlikte, karışımlarda çimento ve su miktarları sabit tutulmuştur.

**Sadece katı madde miktarlarıdır.

5.3.2.3 Üretim, taze beton deneyleri ve numune alma işlemleri

Karıştırma süresi ve karıştırıcı tipi hava sürüklemeye etki etmektedir (Bkz. 2.4.3). Bu nedenle, hava sürükleyici katkıların performanslarının karşılaştırabilmek amacıyla kullanılan malzemeler için karıştırılma sırası ve karıştırma süreleri oluşturulmuştur. Üretimde malzeme eklenme sırası ve karıştırma süreleri Çizelge 5.5’te sunulmaktadır. Beton karışımları 35 dm³ kapasiteli betoniyerde üretilmiştir.

Çizelge 5.5 : Üretimde malzeme eklenme sırası ve karıştırma süreleri.

No	İşlem	Süre, saniye
1	Agregaların ve karışım suyunun 1/4’ünün karıştırılması	30
2	Çimentonun karışıma eklenmesi	-
3	Hava sürükleyici katkı ve karışım suyunun kalan kısmının eklenmesi	30
4	Karıştırma	240

Hava sürükleyici katkı karışım suyunun kalan kısmıyla karıştırılmış ve 30 saniye içinde karışıma eklenmiştir. Üretim işlemi toplamda 5 dakika sürmektedir. Üretim tamamlandıktan sonra taze beton deneyleri yapılmış, sonrasında betonlar tekrar betoniyere atılarak 1 dakika daha karıştırılmış ve kalıplar doldurularak sertleşmiş beton deneyleri için numuneler alınmıştır.

5.3.3 Deneysel yöntemler

5.3.3.1 Hava miktarı ölçümleri

A. Basınç yöntemi - ASTM C 231:

Basınç yöntemi hava miktarının belirlenmesinde en sık kullanılan yöntemdir. “Boyle Kanunu” eşitliğine ($P_1V_1=P_2V_2$) göre hava miktarı belirlenmektedir. Bu yöntem yüksek poroziteli ve hafif betonlar için uygun değildir. Bu tür betonların hava miktarları hacim yöntemi (ASTM C 173) ile belirlenmelidir (Whitting ve Nagi, 1998). ASTM C 231 standardında hava miktarı ölçümleri iki farklı deney aleti kullanılarak yapılabilmektedir (Şekil 5.2). Hava miktarı, ASTM C 231 Tip A hava ölçer ile en fazla %7’ye kadar ölçülebilmektedir. Hava miktarı % 7’den fazla ise sadece bu miktardan fazla olduğu saptanabilmekte esas miktar ölçülememektedir.



Tip A



Tip B

Şekil 5.2 : Hava ölçerler (ASTM C 231).

B. Ağırlık yöntemi - ASTM C 138:

Hava miktarının belirlenmesinde kullanılan en eski ve en basit yöntemdir. Taze betonun birim ağırlığının ölçülmesiyle hava miktarı hesaplanmaktadır. Doğru ve hassas hesaplama için bileşenlerin özgül ağırlıklarının doğru ölçülmesi ve tartının kalibrasyonlu olması şarttır. Hava miktarının hesabı Denklem 5.1’e göre yapılmaktadır.

$$H = [(T-B)/T] \times 100 \quad (5.1)$$

H: Hava miktarı, %.

T: Teorik birim ağırlık (havasız hacmin birim ağırlığı), kg/m^3 .

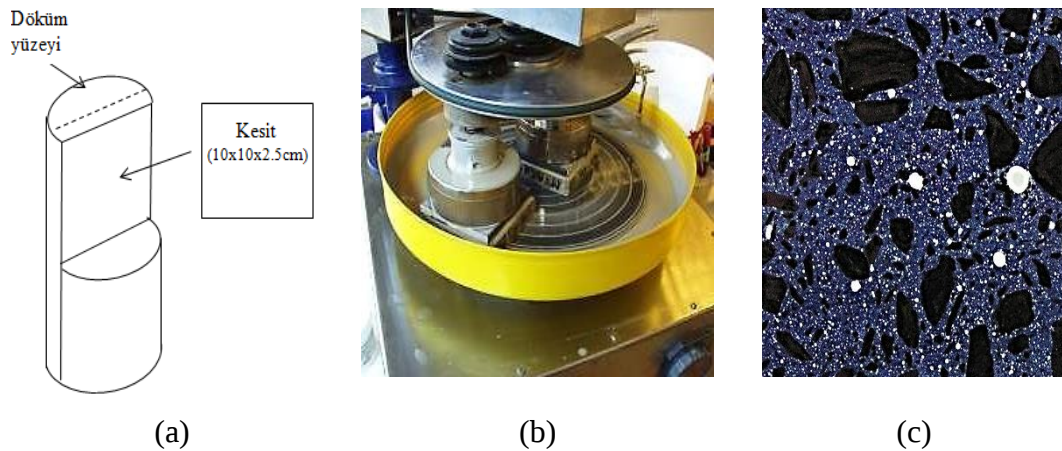
B: Taze betonun deneyle bulunan birim ağırlığı, kg/m^3 .

5.3.3.2 Hava boşluğu sistemi parametrelerinin belirlenmesi

Çalışmada hava boşluğu sistemi araştırmaları petrografik olarak yapılmıştır. Boşluk sistemi parametreleri mikroskop altında ve bilgisayar yazılımı kullanılarak belirlenmiştir.

Numune hazırlama: Analizler silindir (d:10 cm, h:20 cm) numunelerden alınan kesitler ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) üzerinde yapılmıştır (Şekil 5.3 (a)). İncelemenin yapılacağı kesitler ASTM C 457 standardına uygun olarak aşağıda açıklandığı gibi hazırlanmıştır.

- Taş kesme makinası ile betondan kesitin alınması.
- Kesit yüzeyinin kaba tesviyesinin yapılması.
- Mikroskobik inceleme için kesit yüzeyinin ince tesviyesinin yapılması. İnce tesviye işlemi, yüzeyin sırasıyla 300, 600 ve 1200 μm boyutlu silisyum karbür tozu ile aşındırılması ile gerçekleştirilmiştir. Aşındırma işleminin yapıldığı cihaz Şekil 5.3 (b)' de gösterilmektedir.
- Kesit yüzeyi görüntü analizi yapılabilmesi için önce mavi mürekkepli kalemle boyanmış, sonra hava boşlukları baryum sülfat tozu ile doldurulmuş ve agregalar siyah mürekkepli kalemle boyanmıştır (Şekil 5.3 (c)).



Şekil 5.3 : Hava boşluğu sistemi analizleri için numunelerin hazırlanması.

Görüntü analizi: Hava boşluğu sistemi parametreleri bilgisayarda yapılan görüntü analizleri ile belirlenmiştir. Analizler RapidAir457 (versiyon 2.0) yazılımıyla yapılmıştır. Görüntü analizi sonuçlarına göre hava boşluğu sistemi parametreleri ASTM C 457 Prosedür A' ya göre hesaplanmıştır. Görüntü analizinde yapılan işlemler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- İncelenecek kesit mikroskop altındaki tablaya konulur ve tabladaki vidalarla sıkıca yerleştirilir (Şekil 5.4). Aksi halde analiz esnasında yerinden oynayabilir bunun sonucunda da net görüntüler elde edilemez.



Şekil 5.4 : Görüntü analizi cihazı (RapidAir457).

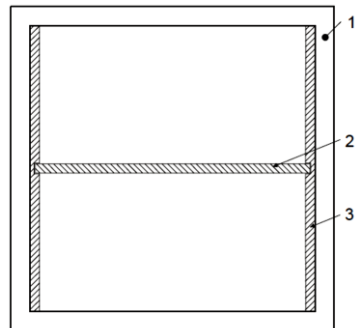
- Analiz yöntemi olarak ASTM C 457 Prosedür A (Linear Traverse Method) seçildi.
- Eşik (Treshold) değeri 101 olarak belirlendi. Eşik değeri betondan betona değişebilir, tüm karışımlarda aynı malzemeler kullanıldığından dolayı analizler tek bir eşik değerinde yapılabilir. Eşik değerinin gereğinden yüksek olması durumunda boşluk çapları gerçek durumundan daha küçük olur. Eşik değerinin gereğinden az olması durumunda hem boşluk çapları gerçek durumundan daha büyük olur hem de hava boşluğu olmayan çok küçük ve düzensiz şekilli boşluklar da değerlendirmeye katılır. Bunların sonucunda da hava boşluk sistemi parametrelerinin değerleri gerçek durumundan daha farklı hesaplanır.
- Hamur oranı beton karışımı miktarlarında hesaplanarak %31 olarak yazılıma girildi.

- Analizin yapılacağı kesit alanı $72,25 \text{ cm}^2$ ($8,5 \times 8,5 \text{ cm}$) olarak belirlendi. ASTM C 457 standardında maksimum agrega tane çapı 19 mm ve 25mm için en düşük kesit alanı sırasıyla 71 cm^2 ve 77 cm^2 'dir.
- Toplam çizgi uzunluğu 2413 mm olarak seçildi. ASTM C 457 standardında Prosedür A yönteminde maksimum agrega tane çapı 19 mm ve 25 mm için en düşük çizgi uzunluğu sırasıyla 2286 mm ve 2413 mm olarak verilmiştir.
- Bir çerçeveden geçecek çizgi sayısı 1 olarak seçildi. ASTM standardındaki analiz ile aynı olması için çizgi sayısı 1 olarak seçildi. RapidAir cihazıyla çizgi sayısı daha fazla seçilerek analiz süresi kısaltılabilmektedir.

5.3.3.3 CDF deneyi

CDF deneyi (Kapiler su emme, Buz çözücü tuzlar ve Donma-çözülme deneyi) RILEM 117 FDC: "Freeze-thaw and deicing resistance of concrete" teknik komitesince hazırlanmış bir donma-çözülme deneyidir. TSE CEN/TS 12390-9 standardında alternatif deney yöntemi olarak yer almaktadır. Numunelerin sadece deney yüzeyinden etkiye maruz kalması dolayısıyla ortam şartlarına en yakın donma-çözülme deneyi olarak görülmektedir (Setzer, 2006). Diğer donma-çözülme deneylerinde numunelerin havada veya suda dondurulup çözündürülmesi ile tüm yüzeyler etkiye maruz bırakılmaktadır.

Numunelerin hazırlanması: 150 mm'lik küp kalıpların PTFE (politetrafloroetilen) levha ile ortadan ikiye ayrılması ile numuneler elde edilir (Şekil 5.5). PTFE plakaya temas eden yüzey deney yüzeyidir. Bu sebeple PTFE plakaya kalıp yağı sürülmemelidir.



1. 150 mm'lik küp kalıp
2. Merkezi PTFE (Politetrafloroetilen) plaka (deney yüzeyi)
3. Yanal PTFE plaka

Şekil 5.5 : Numune boyutları ve elde edilişi.

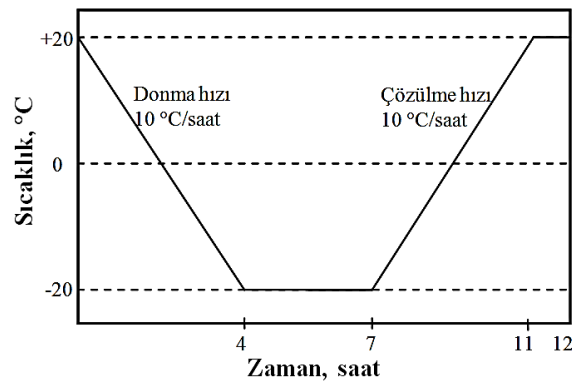
Deney öncesinde numunelerin hazırlığı için gerekli işlemler aşağıdaki sıraya göre yapılmalıdır.

- Taze beton, kalıplara yerleştirildikten sonra kalıplar polietilen örtü ile kaplanarak 1 gün süreyle kurumaya karşı korunurlar. Hava sıcaklığı 20 ± 2 °C olmalıdır.
- 24 ± 2 saat sonra, numuneler kalıplardan çıkarılır ve 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip şebeke suyu ile doldurulmuş bir kür havuzuna yerleştirilir.
- Numuneler 7 günlükken kür havuzundan çıkarılır ve deneyler başlayana kadar 21 gün süreyle 20 ± 2 °C ve % 65 ± 5 bağıl neme sahip kür odasına konulur.
- Taze betonun kalıplara yerleştirilmesinden itibaren geçen 21. ve 26. günler arasında, yanıl yüzeyler, bütıl kauçuk ile yapıştırılmış alüminyum folyo veya uygun bir epoksi kullanılarak kaplanır.

Deney işlemi: Numuneler 28 günlük olduktan sonra 7 gün boyunca kapiler olarak deney sıvısı (kütlece %97 musluk suyu ve %3 NaCl) emdirilerek doygunlaştırılır. getirilir. Deney sıvısı emdirme işlemi kapalı kapta yapılır ve su yüksekliği aralıklarla kontrol edilir. Numuneler 35 günlük olunca deneye başlanır. Donma-çözölme çevrimlerinin yapılacağı kabin ve çevrimlere ait sıcaklık zaman grafiğı sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6 : Donma-çözölme kabini.



Şekil 5.7 : Donma-çözölme çevrimleri.

Pullanma miktarının ölçülmesi: (4 ± 1) ., (6 ± 1) ., (14 ± 1) . ve 28. çevrimlerde aşağıda verilen işlemler gerçekleştirilir.

- Numuneler kabinden alınarak ultrasonik banyonun temas sıvısı içerisine daldırılır ve 3 dakika süreyle ultrasonik temizlemeye maruz bırakılır. Daha sonra numune yüzeyine su jeti uygulanır ve diğer zayıf parçalarda kabın içine dökülür (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 : Numune yüzeyinden zayıf parçaların uzaklaştırılması.

- Kapta toplanan ve pullanmış malzemeyi de içeren çözelti filtreden geçirilir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 : Dökülmüş malzemelerin filtreden geçirilmesi.

- Kağıt filtre daha sonra 24 saat süreyle 110 ± 10 °C’de kurutulur ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta, % 65 ± 5 bağıl nemli ortamda (60 ± 5) dakika süreyle soğutulur.
- Kurutulmuş filtre kağıdı 0,1 g hassasiyetle tartılır.

Hesaplamalar:

Pullanan malzemenin kuru kütlesi $m_{s,n}$ aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

$$m_{s,n} = m_{\text{önce}} + (m_{s+f} - m_f)$$

$m_{s,n}$: n adet çevrim sonunda pullanan malzemenin 0,1 g'a yuvarlatılarak belirlenen kurutulmuş yığışımli kütlesi.

$m_{s,\text{önce}}$: Bir önceki çevrimde hesaplanan kurutulmuş pullanan malzemenin yığışımli kütlesi.

m_{s+f} : Üzerinde pullanmış malzeme bulunan filtre kağıdının kurutularak 0,1 g hassasiyetle tartılmış kütlesi.

m_f : Kuru filtrenin 0,1 g hassasiyetle tartılmış kütlesi.

Her ölçüm işlemi ve her numune için, n çevrim sonunda birim alan başına pullanmış malzemenin yığışımli kütlesi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \times 10^3$$

S_n : n adet donma-çözülme çevrimi sonunda pullanmış malzemenin kütlesi, kg/m^2 .

$m_{s,n}$: n adet donma-çözülme çevrimi sonunda pullanmış malzemenin yığışımli kuru kütlesi.

A : Deneye tabi tutulan beton numune yüzeyinin mm^2 olarak alanı, en az iki ölçümün ortalaması olarak doğrusal boyut ölçümlerinden 0,5 mm yaklaşımla yuvarlanarak hesaplanan alan.

Pullanmış malzemenin ortalama değeri ve standart sapması değerlendirilir.

5.3.3.4 Elektriksel iletkenlik ölçümleri

Elektriksel iletkenlik ölçümleri kendi kalibrasyonunu yapabilen basit bir direnç ölçer (eskor marka els-132A model) kullanılarak yapılmıştır. Cihazdan okunan direnç değerleri numune boyuyla çarpıldıktan sonra bulunan değer tersi alınarak elektriksel iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Ölçümler 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde olan silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Elektriksel direnç ölçümleri numunenin yüzey ıslaklığından ve ortam şartlarından etkilenmektedir (Şengül, 2012). Bu nedenle ölçümler, havuzdan çıkarılan numuneler 20 ± 2 °C ve 65 ± 5 bağıl neme sahip ortamda 90 dakika bekletildikten sonra yapılmıştır.

5.3.3.5 Geçirimsizlik deneyleri ölçümleri

Deneyler çapı 10 cm yüksekliği 20 cm olan silindir numuneden alınan kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Döküm yüzeyinden 2 cm kesilerek atıldıktan sonra alınan 5 cm yüksekliğindeki kesit üzerinde kılcal su geçirimsizliği daha sonra alınan 5.1 cm yüksekliğindeki kesit üzerinde ise elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyleri yapılmıştır. Kılcal su geçirimsizliği deneyi ASTM C 1585, elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyi ASTM C 1202 standartlarına göre yapılmıştır. Elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyi 60 volt doğru akım uygulayan ve $\pm 0,1$ mA hassasiyette ölçüm yapan bir cihaz (PROOVE'it®) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler 6 saat sürmektedir. Ölçümler sonucu numuneden geçen akım şiddeti-zaman grafiği çizilmiş ve iletilen elektrik akımı miktarı coulomb cinsinden hesaplanmıştır.

5.3.4 Deney sonuçları

5.3.4.1 Taze beton deney sonuçları

Taze beton deneylerine ait sonuçlar Çizelge 5.6'da sunulmaktadır. Hava miktarı ölçümleri 5.3.3.1'de açıklanan her iki yöntemle de yapılmıştır. Ayrıca, birim ağırlık ölçümleri de her iki hava ölçerin kapları kullanılarak da yapılmıştır.

Çizelge 5.6 : Taze beton deneylerine ait sonuçlar.

Kod	Çökme cm	Ortam sıcak., °C	Beton sıcak., °C	Birim ağırlık, kg/m ³			Hava miktarı, %			
				Teorik	Kap A	Kap B	Teorik	ASTM C 138	ASTM C 231-A	ASTM C 231-B
K	5,0	20,4	21,3	2388	2400	2413	1,0	0,0	1,8	1,5
1D	6,0	22,6	22,9	2347	2387	2370	2,5	1,5	2,4	2,3
1Y	9,0	22,6	22,9	2266	2299	2273	5,5	5,2	6,0	5,6
2D	6,0	20,8	21,4	2347	2366	2356	2,5	2,1	2,5	2,9
2Y	10,0	20,7	21,5	2211	2239	2212	7,5	7,5	>7	7,8
3D	6,5	20,0	20,7	2347	2389	2388	2,5	0,8	2,0	2,5
3Y	9,5	20,5	20,9	2307	2339	2319	4,0	3,5	4,1	4,2
4D	7,0	21,0	21,5	2361	2388	2372	2,0	1,5	2,0	1,9
4Y	6,5	21,2	21,7	2320	2351	2343	3,5	2,5	3,7	3,2
5D	7,5	21,6	21,5	2361	2406	2373	2,0	1,5	2,1	1,8
5Y	8,5	22,5	22,7	2320	2345	2340	3,5	2,7	3,8	3,6
6D	5,0	21,7	21,4	2347	2387	2381	2,5	1,1	2,3	2,5
6Y	8,0	21,7	20,7	2307	2320	2324	4,0	3,3	4,4	4,0

Betonlar, tasarım aşamasında hedeflenen kıvam sınıfını (S2, 5-10 cm) sağlamıştır. Malzemeler, bir gün öncesinde laboratuvara konulmuş ve üretimler 21 ± 2 °C’de laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece tüm karışımlarda sıcaklık 21 ± 2 °C elde edilerek, sıcaklığın sonuçlar üzerindeki etkisi azaltılmıştır.

5.3.4.2 Hava boşluğu sistemi parametreleri

Hava boşluğu sistemi parametreleri 5.3.3.2’de açıklanan yöntemle belirlenmiştir. Betonlara ait hava boşluğu sistemi parametreleri Çizelge 5.7’de sunulmaktadır. Hava boşluğu sistemi parametrelerine ek olarak analiz sonucu hesaplanan boşluk frekansı, ortalama giriş uzunluğu ve hamur/hava oranı değerleri de Çizelge 5.7’de sunulmaktadır.

Çizelge 5.7 : Hava boşluğu sistemi parametreleri.

Kod	Hava miktarı %	Özgül yüzey mm^2/mm^3	Aralık faktörü mm	Boşluk frekansı mm^{-1}	Ort., giriş uzunluğu mm	Hamur/hava oranı
K	1,0	16,2	0,722	0,035	0,277	31,63
1D	2,3	17,5	0,462	0,091	0,258	13,25
1Y	3,4	45,5	0,152	0,339	0,100	9,17
2D	3,3	20,4	0,323	0,157	0,209	9,45
2Y	4,9	47,0	0,115	0,550	0,089	6,31
3D	2,0	20,3	0,401	0,096	0,209	15,42
3Y	3,2	32,5	0,205	0,242	0,131	9,81
4D	1,8	19,1	0,473	0,075	0,232	17,71
4Y	2,1	29,2	0,296	0,134	0,158	14,69
5D	1,6	14,3	0,616	0,056	0,294	18,90
5Y	2,3	27,5	0,294	0,140	0,161	13,66
6D	2,0	12,3	0,655	0,059	0,341	15,50
6Y	3,3	41,6	0,159	0,305	0,100	10,20

5.3.4.3 Donma-çözülme deneyi sonuçları

Donma-çözülme deneyleri 5.3.3.3’de açıklanan CDF deneyine göre yapılmıştır. CDF deneyinde yapılan ölçümler sonucu pullanma değerleri hesaplanmıştır. Pullanma hasarının yanı sıra içsel hasar oluşumu ve derecesi de araştırılmıştır. İçsel hasar ağırlık ve ultrases geçiş süresi ölçümleri sonucunda hesaplanan su emme ve Bağıl Dinamik Elastisite Modülü (BDEM) değerleri ile belirlenmiştir. BDEM, ultrases geçiş süresinin deney sonunda ölçülen değerinin deney öncesi ölçülen değerine oranı olup azalmasıyla içsel hasarın oluştuğu belirlenir. Ultrases geçiş süreleri ölçümleri ve su emme ile bağıl dinamik elastisite modülü hesaplamaları RILEM TC 176-IDC ve

BS 15177 standartlarında yer alan ve 6. Bölüm (6.3.3.1)'de anlatılan CIF (Kapiler su emme, İçsel hasar ve Donma-çözülme deneyi) deneyine göre yapılmıştır. Her bir seriden üçer numune üzerinde yapılan donma-çözülme deneylerine ait sonuçlar Çizelge 5.8'de verilmektedir. Pullanma ve su emme deneyleri standartlarda belirtilen çevrimlerde yapılırken bağıl dinamik elastisite ölçümleri pullanma deneyi sonuçlarını etkilememesi için sadece donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasında yapılmıştır.

Çizelge 5.8 : Donma-çözülme deneyi sonuçları.

Kod	Pullanma, kg/m ²				Su emme, %				BDEM
	Çevrim sayısı				Çevrim sayısı				
	4	6	14	28	4	6	14	28	
K	0,21	0,84	4,17	11,57	1,31	1,38	1,99	3,06	0,17
1D	0,18	0,44	2,63	6,37	1,34	1,46	1,87	2,47	0,60
1Y	0,03	0,05	0,10	0,17	1,20	1,30	1,73	2,22	1,03
2D	0,08	0,19	0,77	2,10	1,29	1,36	1,70	2,04	1,00
2Y	0,03	0,05	0,08	0,18	1,52	1,64	2,13	2,57	0,99
3D	0,20	0,75	3,69	9,00	1,29	1,37	1,84	2,76	0,34
3Y	0,03	0,06	0,22	0,63	1,59	1,69	2,02	2,38	0,88
4D	0,19	0,67	3,30	7,86	1,22	1,32	1,76	2,48	0,65
4Y	0,14	0,32	1,73	4,55	1,18	1,27	1,61	2,06	0,94
5D	0,17	0,55	3,27	8,17	1,17	1,29	1,71	2,63	0,57
5Y	0,08	0,17	0,98	3,50	1,28	1,41	1,91	2,37	0,79
6D	0,13	0,88	3,51	7,87	1,27	1,34	1,95	2,69	0,26
6Y	0,07	0,11	0,23	0,42	1,57	1,67	2,13	2,48	1,04

5.3.4.4 Mekanik özelliklerle ilgili yapılan deneylerin sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan mekanik özellik deneyleri Çizelge 5.9'da, deneylere ait sonuçlar Çizelge 5.10'da verilmektedir. Mekanik özellik deneyleri betonlar 28 günlükken yapılmıştır. Deneyler 3000 kN kapasiteli yükleme cihazında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.9 : Mekanik özellikler deneyleri.

Mekanik özellik	Numune boyutu, cm	Numune adedi	Yükleme hızı, kN/s	Uygulanan standart
Basınç dayanımı	d:10 h:20	3	7,0	TS EN 12390-3
Elastisite modülü	d:10 h:20	2	0,5	TS 3502
Yarma-çekme dayanımı	d:10 h:10	4	3,0	TS EN 12390-6

Çizelge 5.10 : Mekanik özellikler deney sonuçları.

Kod	Basınç dayanımı MPa	Elastisite modülü GPa	Yarma-çekme dayanımı, MPa
K	43,5	32,2	4,7
1D	41,1	31,2	3,8
1Y	34,6	25,5	3,3
2D	40,4	29,7	3,9
2Y	31,5	25,7	3,2
3D	43,4	31,1	4,5
3Y	37,4	28,6	4,0
4D	41,0	30,8	4,1
4Y	39,2	29,8	3,9
5D	42,4	30,7	4,5
5Y	39,6	28,6	3,9
6D	42,0	29,9	3,6
6Y	36,5	30,0	3,7

5.3.4.5 İletkenlik özellikleri ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları

Elektriksel direnç ve ultrases geçiş süresi ölçümleri yapılarak, betonların elektriksel iletkenlik ve ultrases geçiş hızları hesaplanmıştır. Elektriksel direnç ölçümleri 5.3.3.4'te anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Elektriksel direnç ölçümleri, betonlar 14 günlükken 7, 28 günlükken ise 6 numune üzerinde yapılmıştır. Ultrases geçiş süresi ölçümleri ise numuneler 28 günlükken ve 3 numune üzerinde yapılmıştır. İletkenlik deneylerine ait sonuçlar Çizelge 5.11'de verilmektedir.

Çizelge 5.11 : İletkenlik deneyleri sonuçları.

Kod	Elektriksel iletkenlik 1/(kΩ.cm)		Ultrases geçiş hızı m/s
	14. Gün	28. Gün	
K	0,243	0,210	4660
1D	0,224	0,203	4577
1Y	0,214	0,201	4454
2D	0,197	0,188	4435
2Y	0,195	0,184	4141
3D	0,212	0,197	4650
3Y	0,201	0,189	4420
4D	0,221	0,200	4535
4Y	0,236	0,207	4566
5D	0,217	0,206	4619
5Y	0,233	0,195	4505
6D	0,236	0,205	4525
6Y	0,207	0,186	4405

5.3.4.6 Geçirimsizlik özellikleri ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları

Betonların geçirimsizlik özellikleri, kılcal su geçirimsizliği ve elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyleri ile araştırılmıştır. Deneyler 5.3.3.5'te anlatılan yöntemlere uygun olarak yapılmıştır. Kılcal su geçirimsizliği deneyi sonucunda hesaplanan, birincil ve ikincil su emme hızları ile elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyi sonucu hesaplanan, iletilen elektrik akım miktarı değerleri Çizelge 5.12'de verilmektedir.

Çizelge 5.12 : Geçirimsizlik deneyleri sonucunda hesaplanan değerler.

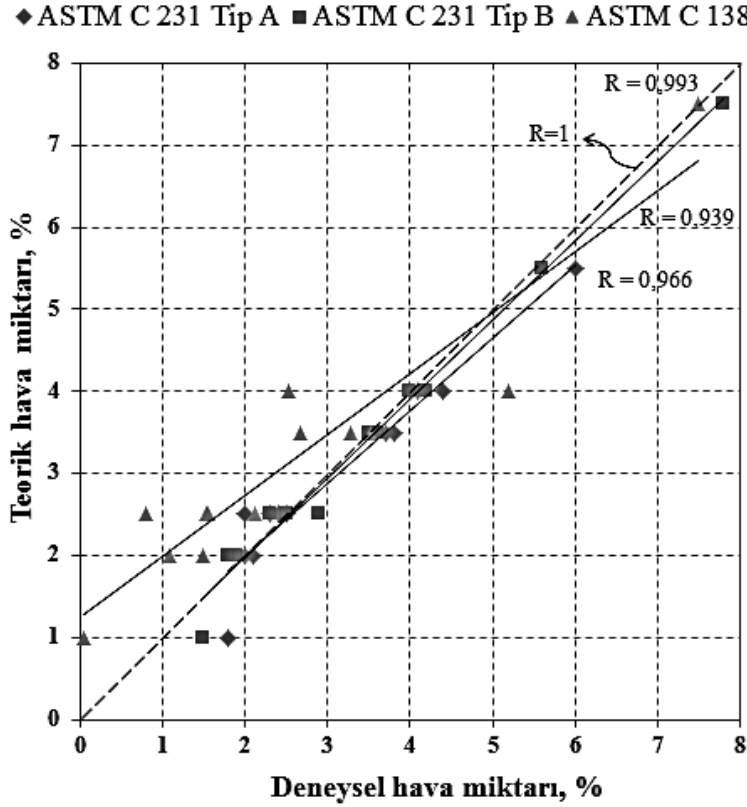
Kod	Su emme hızı $\times 10^{-4} \text{ mm}/\sqrt{s}$		İletilen elektrik akımı miktarı, coulomb
	Birincil	İkincil	
K	45	14	4904
1D	49	11	4798
1Y	50	10	4529
2D	40	11	4739
2Y	47	14	4479
3D	50	15	4020
3Y	51	15	4942
4D	49	13	5153
4Y	49	11	5528
5D	45	11	4696
5Y	45	10	5062
6D	51	10	4477
6Y	55	10	4259

5.3.5 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Donma-çözülme dayanıklılığı üzerinde taze beton hava miktarı ve hava boşluğu sistemi parametrelerinin etkileri sırasıyla 5.3.3.1 ve 5.3.3.2'de anlatılan yöntemlerle araştırılmıştır. Hava boşluğu sistemi parametrelerinin ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasının, donma-çözülme (pullanma ve içsel), mekanik (basınç ve yarma dayanımları ile elastisite modülleri), iletkenlik (elektriksel iletkenlik ve ultrases geçiş hızı) ve geçirimsizlik (kılcal su geçirimsizliği ve elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi) özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Uygulanan deneysel yöntemler ilgili bölümünde anlatılmıştır. Araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sırayla değerlendirilmektedir.

5.3.5.1 Taze beton deneyleri

Taze betonlar üzerinde yapılan hava miktarı ölçümlerinin teorik hava miktarı ile karşılaştırılması Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10 : Teorik ve deneysel hava miktarları.

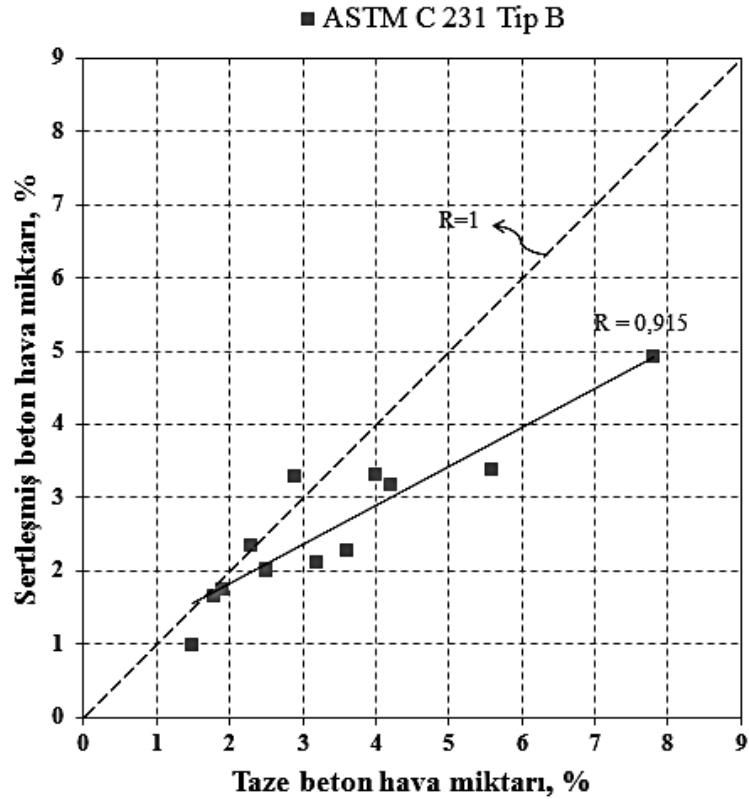
Teorik hava miktarları yapılan ölçülebilecek hava miktarında kısıtlama olmaması ve deneme üretimlerinde en yüksek korelasyona sağlaması nedeniyle ASTM C 231 standardındaki B tipi hava ölçer ile yapılan ölçüm sonuçlarına göre kabul edilmiştir. Her iki tip hava ölçer ile ölçülen hava miktarları, tasarım hesaplarında kullanılan teorik hava miktarı ile yüksek korelasyon vermiştir. A tipi hava ölçerle en fazla %7 hava miktarı ölçülebildiği için hava miktarı %7,5 olan 2Y karışımın hava miktarı belirlenememiştir. Bu nedenle korelasyonu B tipi hava ölçere kıyasla daha düşük olmuştur. Birim ağırlık yöntemiyle (ASTM C 138) hesaplanan hava miktarları ise özellikle düşük hava miktarlarında teorik hava miktarından daha düşük çıkmıştır.

Taze betonların birim ağırlık değerlerini, malzemelerin özgül ağırlıklarının doğru ölçülmesi, üretim öncesi malzeme miktarlarının doğru tartılması, ölçüm kabının homojen ve uygun biçimde doldurulması gibi bir çok olay etkileyebilmektedir. Her iki hava ölçerin kabıyla belirlenen birim ağırlıklar teorik birim ağırlıktan daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuçlar, birim ağırlık yöntemi ile hesaplanan hava

miktarını etkilemiş ve teorik hava miktarından daha düşük hava miktarları elde edilmiştir.

5.3.5.2 Hava boşluğu sistemi analizleri

Sertleşmiş betonlar üzerinde yapılan hava boşluğu analizleri sonucu elde edilen hava miktarı ile taze halde hava ölçerle ölçülen değerler ve teorik hava miktarları Şekil 5.11’de incelenmektedir.

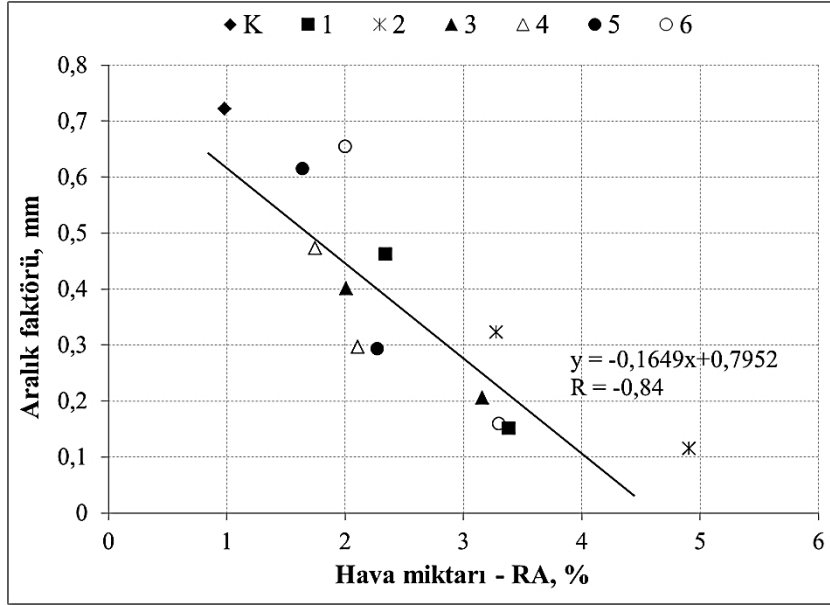


Şekil 5.11 : Sertleşmiş beton ve taze beton hava miktarları.

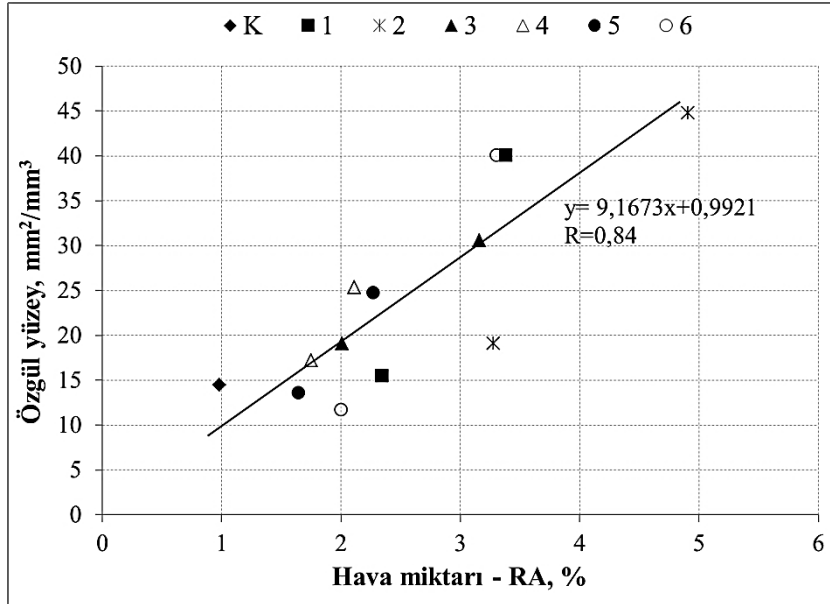
Sertleşmiş beton kesitlerinde yapılan analizler sonucu hesaplanan hava miktarları taze haldeki betonlarda ölçülen hava miktarlarından (özellikle %2,5’den yüksek hava miktarlarında) daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni, numune alınırken yapılan şişleme ve tokmaktama işlemleri sayesinde hapsolmuş hava boşluklarının oluşmamasıdır. Benzer işlemler birim ağırlık kabı doldurulurken de yapılmaktadır. Gerek beton kıvamı gerek birim ağırlık kabının boyutu etkili olmuş ve hapsolmuş havalardan dolayı hava miktarı daha yüksek çıkmıştır. Taze beton hava miktarının daha yüksek olmasının bir başka nedeni de ölçüm yöntemi olabilir. Literatürde hava sürüklenmiş betonlarda, hava miktarı ölçümleri için ASTM C 173’e göre ölçüm

yapan hava ölçerler önerilmektedir. Bu çalışmada ise yaygın olarak kullanılan hava ölçerler kullanılmıştır.

Aralık faktörü ve özgül yüzeyin hava miktarına göre değişimleri sırasıyla Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmektedir.



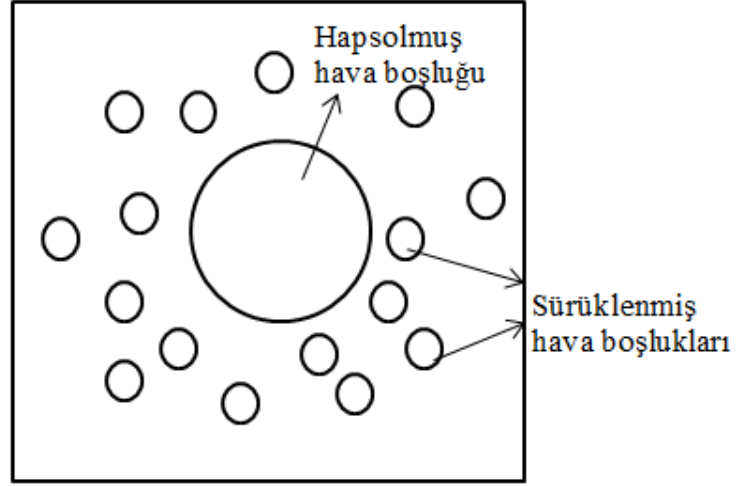
Şekil 5.12 : Aralık faktörünün hava miktarı ile değişimi.



Şekil 5.13 : Özgül yüzeyin hava miktarı ile değişimi.

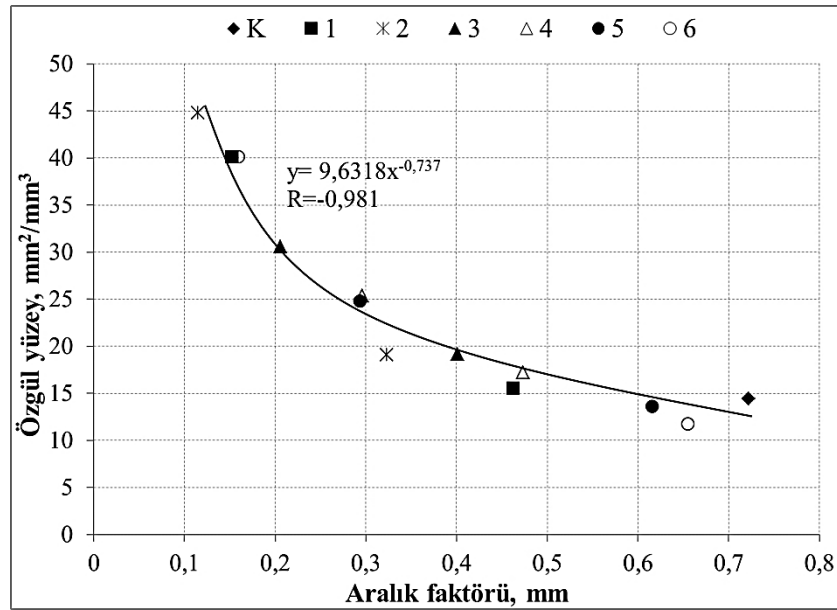
Hava miktarının artmasıyla aralık faktörü azalmış, özgül yüzey değerleri ise artmıştır. Hava miktarının yaklaşık %3 değerinde 2 numaralı katkının diğer katkılara kıyasla daha yüksek aralık faktörüne ve daha düşük özgül yüzey değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni hapsolmuş hava boşluklarıdır. Sertleşmiş betonda

yapılan hava boşluk analizlerinde kesite giren bir hapsolmuş hava boşluğu hava miktarının olduğundan fazla hesaplanmasını sağlarken, aralık faktörü ve özgül yüzey hesaplamalarına kayda değer bir etki yapmamaktadır. Bu durum Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



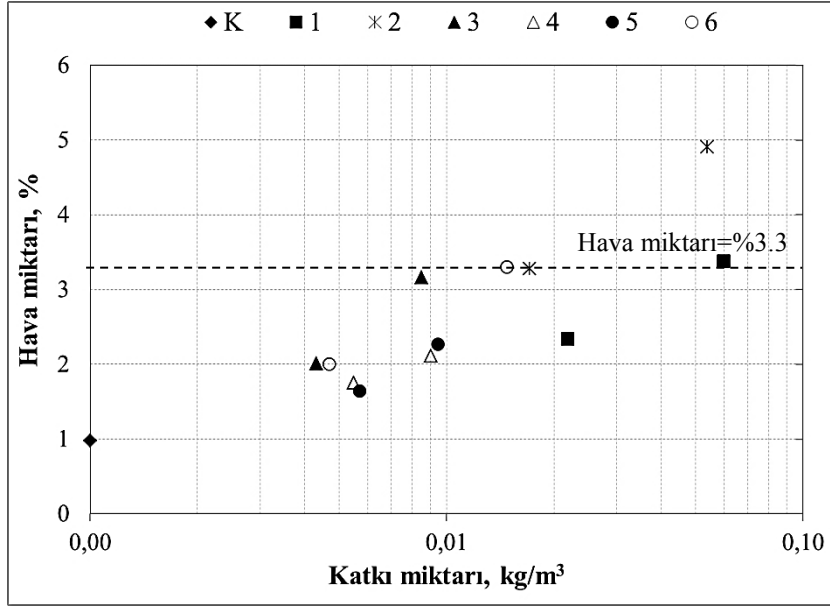
Şekil 5.14 : Sertleşmiş beton kesitinde hava boşlukları.

Özgül yüzey ile aralık faktörü ilişkisi Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Şekil 5.15 : Özgül yüzey ile aralık faktörü ilişkisi.

Katkı miktarı - hava miktarı grafiği Şekil 5.16'da verilmektedir. Yaklaşık %3,3 hava miktarı değerinde, reçine esaslı (1 ve 2) katkılardan diğer katkılara kıyasla daha fazla miktarda kullanılması gerektiği görülmüştür. Bu sonuç, Bölüm 3'te yapılan yüzey gerilimi ölçümleri ile uyumludur.

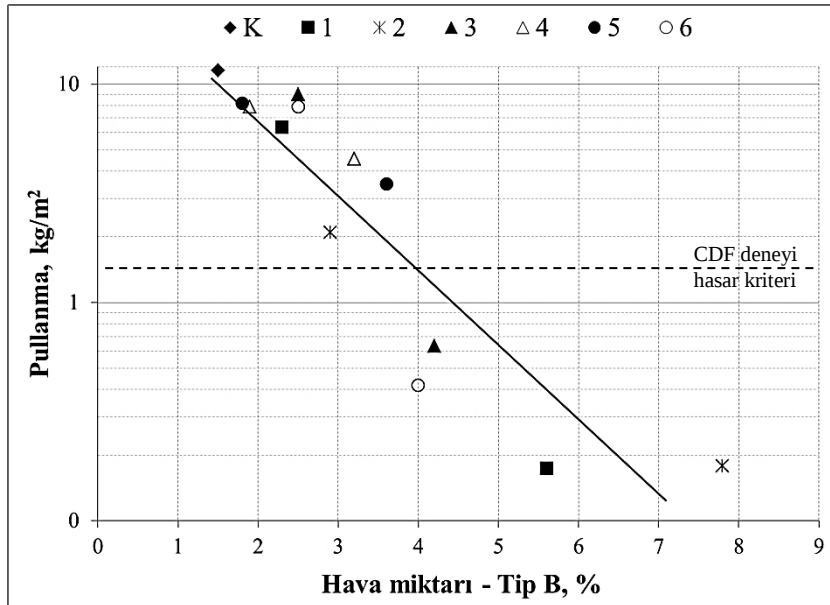


Şekil 5.16 : Hava miktarının katkı miktarı ile değişimi.

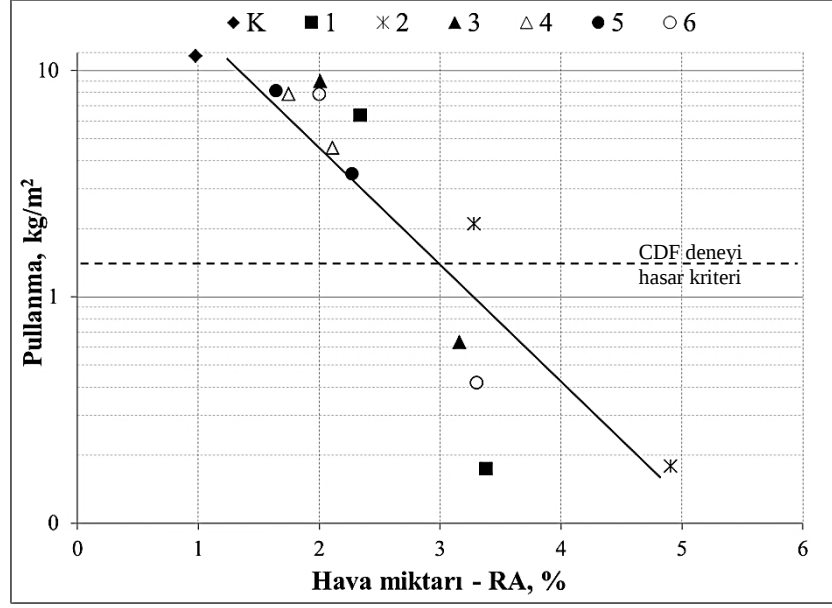
5.3.5.3 Donma-çözülme deneyleri

Pullanma:

Taze ve sertleşmiş beton hava miktarının pullanma hasarı üzerine etkisi sırasıyla Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmektedir.

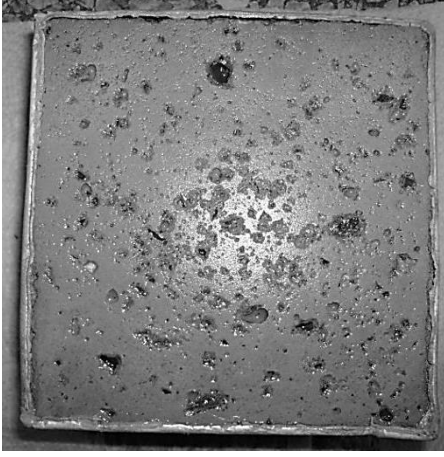


Şekil 5.17 : Taze beton hava miktarının pullanma hasarına etkisi.

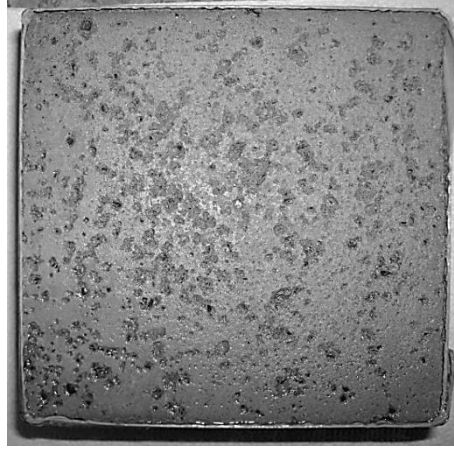


Şekil 5.18 : Sertleşmiş beton hava miktarının pullanma hasarına etkisi.

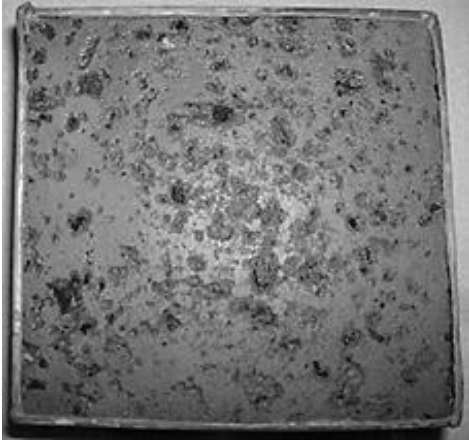
Grafiklerde pullanma hasarı eksen, hasar miktarları arasında büyük farklılıklar olmasından dolayı, düşük hasar miktarlarında yeterli değerlendirme yapılabilmesi için logaritmik olarak verilmiştir. Pullanma hasarı için deneyin uygulandığı standartta hasar kriteri olarak $1,5 \text{ kg/m}^2$ değeri belirtilmiştir. Pullanma - hava miktarı grafiklerinden su/çimento oranı 0,55 olan betonlarda pullanma dayanıklılığı için minimum hava miktarının taze betonda %4, sertleşmiş betonda ise %3 olması gerektiği görülmüştür. Bu değerlerden daha düşük hava miktarlarında hiçbir hava sürükleyici katkı yeterli performans sergilememiştir. Reçine esaslı olan 2 nolu katkının düşük dozajda kullanıldığı karışım ise sertleşmiş beton hava miktarı %3'ün üzerinde olmasına rağmen yeterli pullanma dayanıklılığı sergilememiştir. Bunun nedeni ise analizin yapıldığı kesitte yer alan hapsolmuş hava boşluklarının hava miktarı değerini arttırmasıdır. Hapsolmuş hava boşlukları hava miktarını arttırırken aralık faktörü ve özgül yüzey değerlerini etkilememiştir. Yeterli pullanma dayanıklılığı sağlayan betonlara ait 28. çevrim sonrası çekilen fotoğraflar Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



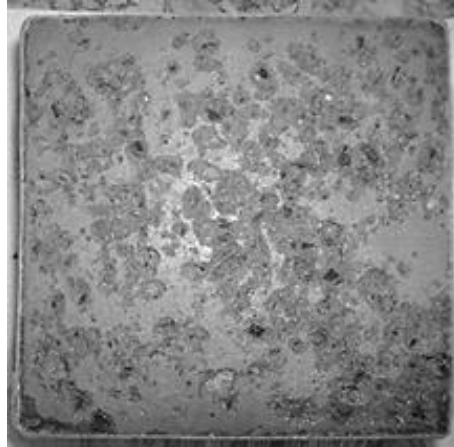
(a) 12 kodlu numune, pullanma=0,17 kg/m²
HM: 3,38, AF: 0,152, ÖY: 40,1



(b) 22 kodlu numune, pullanma=0,18 kg/m²
HM: 4,91, AF: 0,115, ÖY: 44,8



(c) 62 kodlu numune, pullanma=0,42 kg/m²
HM: 3,30, AF: 0,159, ÖY: 40,1



(d) 32 kodlu numune, pullanma=0,63 kg/m²
HM: 3,16, AF: 0,205, ÖY: 30,6

Şekil 5.19 : Yeterli pullanma dayanıklılığına sahip beton yüzeyleri.

Yeterli pullanma dayanıklılığı gösterememiş bazı numunelere ait görüntüler ise Şekil 5.20’de gösterilmektedir.



(a) 21 kodlu numune, pullanma=2,1 kg/m²
HM: 3,28, AF: 0,320, ÖY: 19,1



(b) 52 kodlu numune, pullanma=3,5 kg/m²
HM: 2,3, AF: 0,293, ÖY: 24,8



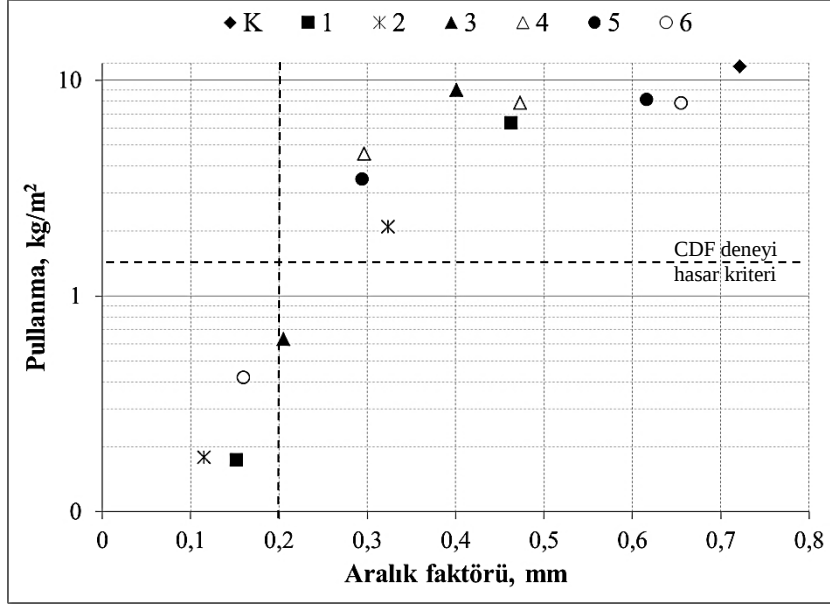
(c) 41 kodlu numune, pullanma=7,86 kg/m²
HM: 1,75, AF: 0,474, ÖY: 17,2



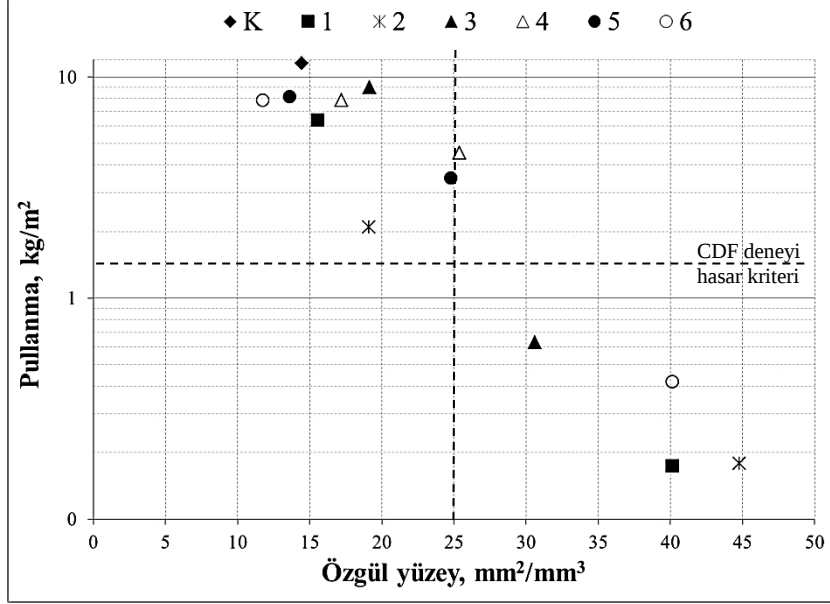
(d) K kodlu numune, pullanma=11,6 kg/m²
HM: 1, AF: 0,722, ÖY: 14,4

Şekil 5.20 : Pullanma hasarına uğramış beton yüzeyleri.

Pullanma hasarının aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri ile ilişkisi sırasıyla Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmektedir. Şekillerde kesikli çizgilerle CDF deneyi hasar kriteri ve yeterli donma-çözülme dayanıklılığı için önerilen aralık faktörü ve özgül yüzey değeri gösterilmiştir.



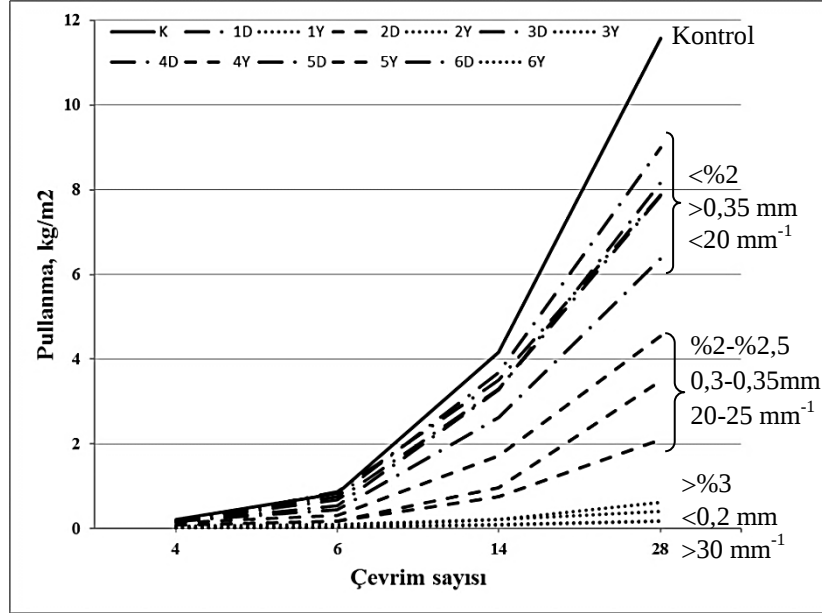
Şekil 5.21 : Pullanma hasarı ile aralık faktörü ilişkisi.



Şekil 5.22 : Pullanma hasarı ile özgül yüzey ilişkisi.

Aralık faktörü 0,2 mm'den düşük ve özgül yüzey değerleri $25 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ 'ten yüksek olan betonlar yeterli pullanma dayanıklılığı göstermiştir. Hava miktarı %3'ten fazla olmasına rağmen yeterli pullanma dayanıklılığı sergilemeyen, 2 nolu katkının kullanıldığı karışımın yeterli aralık faktörü ve özgül yüzey değerlerine sahip olmadığı görülmüştür. Bu nedenle pullanma dayanıklılığının değerlendirilmesinde sadece hava miktarı ölçümlerinin yeterli olmadığı, diğer hava boşluğu sistemi parametrelerinin de dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

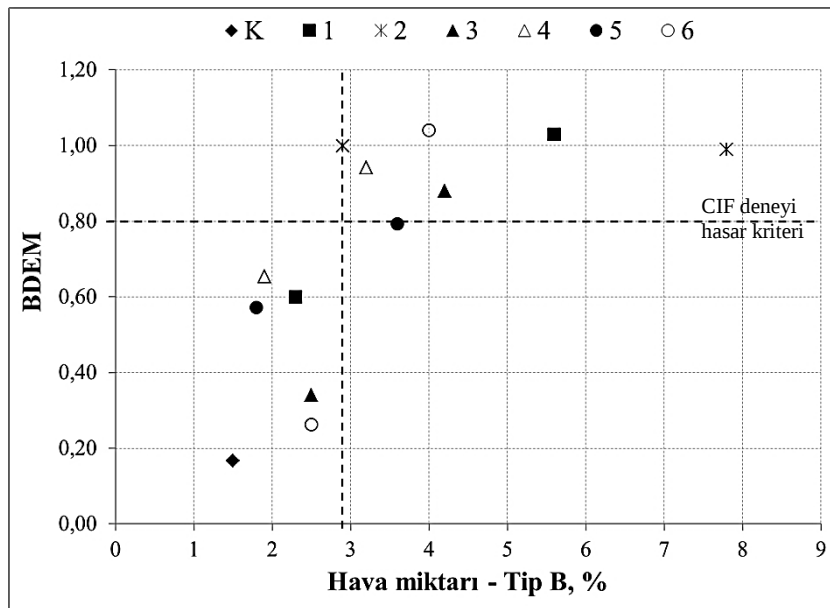
Pullanma miktarı çevrim sayısı grafiği Şekil 5.23'te verilmektedir. Beton karışımlarına ait kodlamalar ve pullanma hasarı derecesi için hava boşluk sistemi parametreleri grafik üzerinde belirtilmiştir.



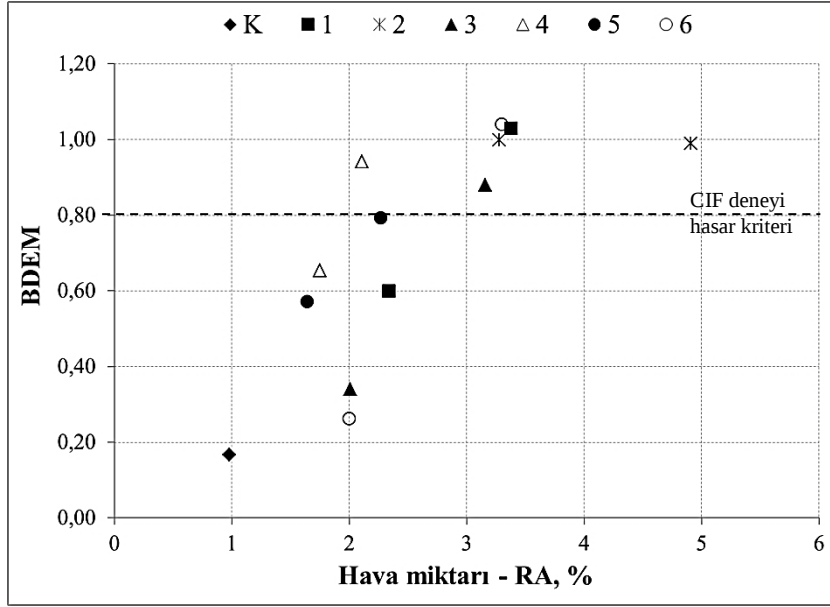
Şekil 5.23 : Pullanma miktarının çevrim sayısı ile değişimi.

İçsel hasar:

İçsel hasarın göstergesi olan bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM)'nin ve taze ve sertleşmiş hava miktarı ile değişimi sırasıyla Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmektedir. Şekillerde kesikli çizgilerle CIF deneyi hasar kriteri ve taze betonda hasarın oluşmadığı minimum hava miktarı gösterilmiştir.



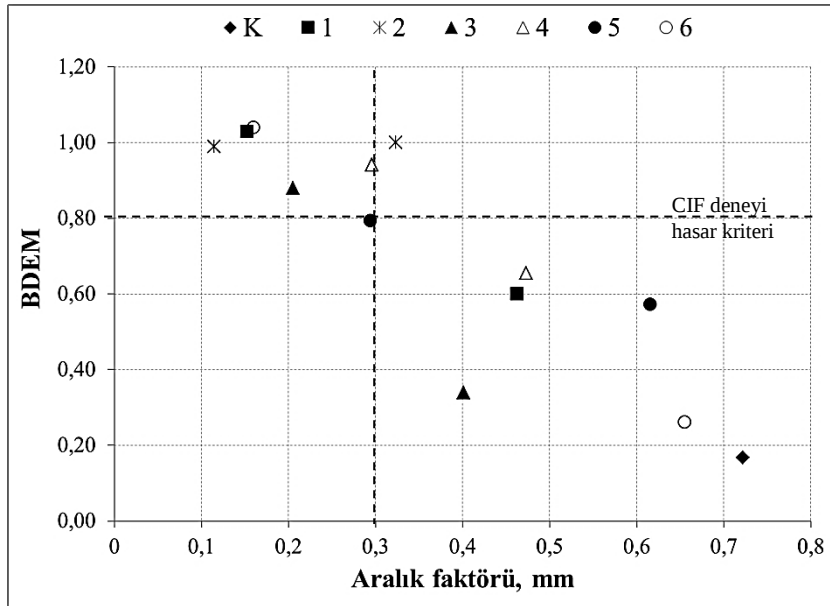
Şekil 5.24 : BDEM'nin taze beton hava miktarı ile değişimi.



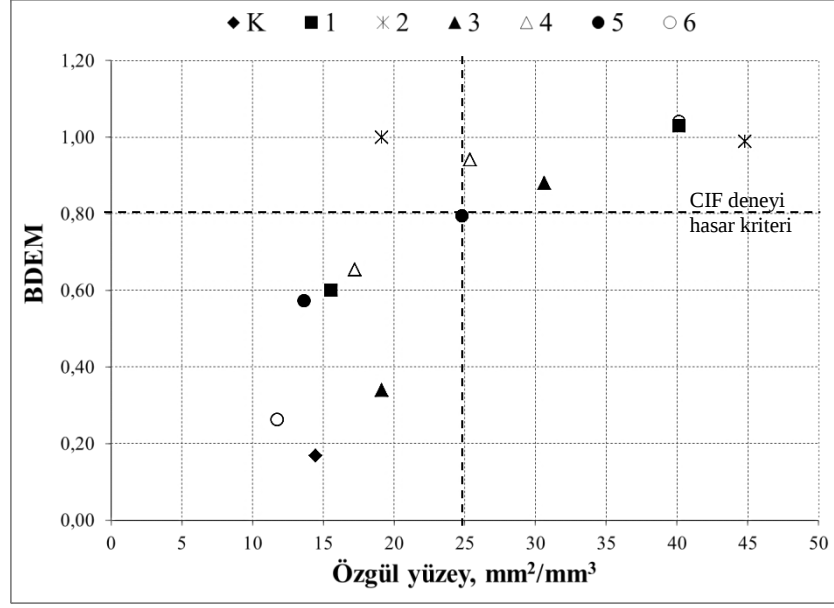
Şekil 5.25 : BDEM'nin sertleşmiş beton hava miktarı ile değişimi.

Su/çimento oranı 0,55 olan betonlarda, taze betonun hava miktarı %3'ten fazla ise içsel hasar kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Sertleşmiş betonlarda ise belirgin bir sınır hava miktarı değeri görülmemiştir.

BDEM'nin aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri ile ilişkisi sırasıyla Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de verilmektedir. Şekillerde kesikli çizgilerle CIF deneyi hasar kriteri ve yeterli donma-çözülme dayanıklılığı için önerilen aralık faktörü ve özgül yüzey değeri gösterilmiştir.



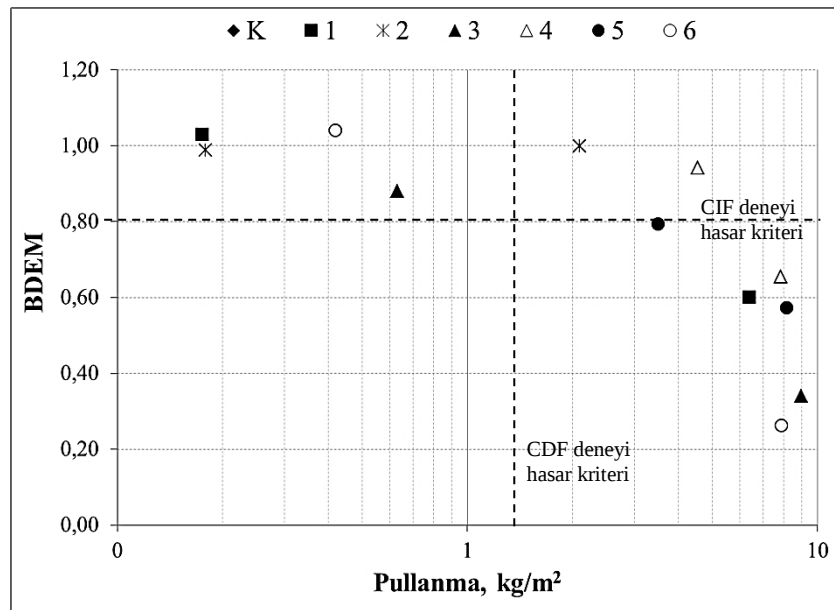
Şekil 5.26 : BDEM ile aralık faktörü ilişkisi.



Şekil 5.27 : BDEM ile özgül yüzey ilişkisi.

Aralık faktörü 0,3 mm'den az, özgül yüzey değeri ise 25 mm²/mm³ değerinden yüksek olan betonlarda içsel hasarın kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. BDEM ile hava boşluğu sistemi parametreleri değerlendirmeleri sonucunda, hava sürükleyici katkı tipinin etkisinin hava boşluğu sistemi üzerine olduğu içsel hasar üzerine belirgin bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

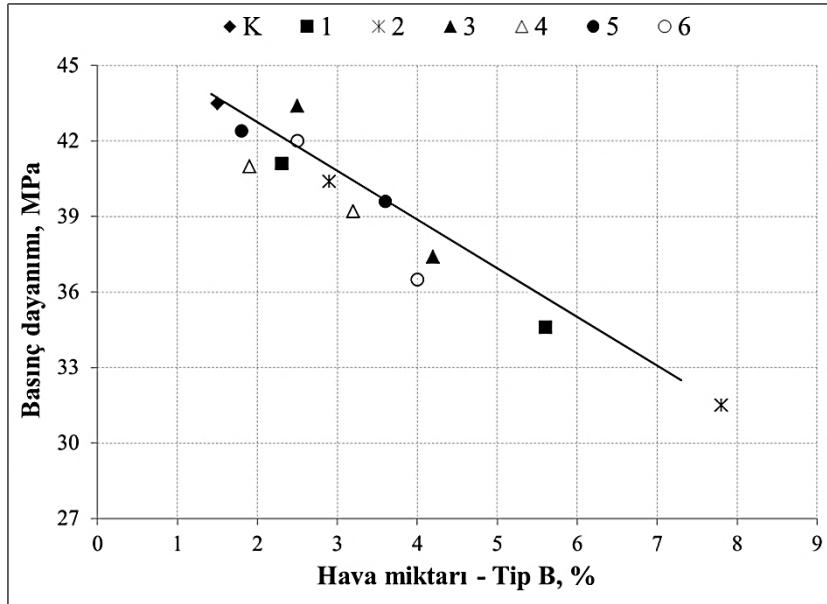
İçsel hasar ile pullanma hasarı arasındaki ilişki Şekil 5.28'de verilmektedir. Donma-çözülme deneylerinde NaCl çözeltisi kullanılmasından dolayı pullanma hasarı baskın olmuştur.



Şekil 5.28 : BDEM - pullanma grafiği.

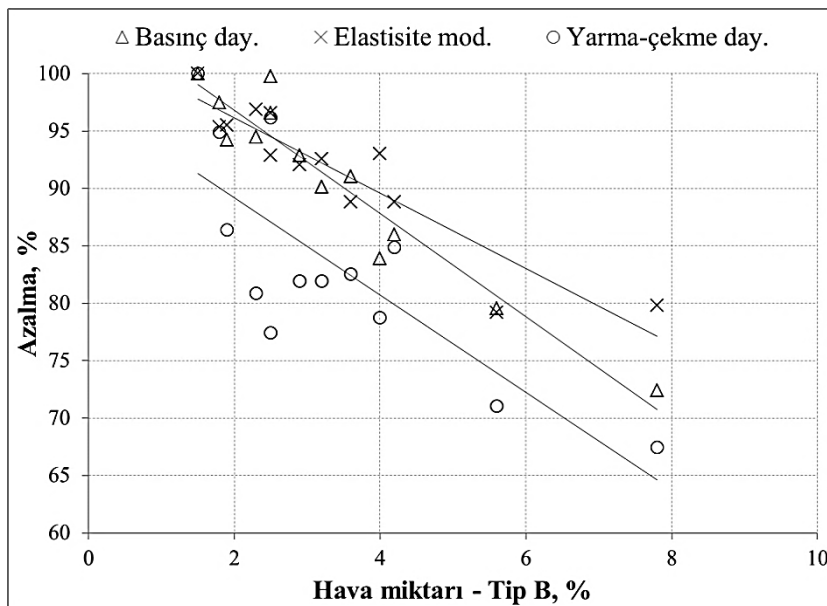
5.3.5.4 Mekanik özellikler deneyleri

Basınç dayanımının hava miktarı ile değişimi Şekil 5.29’da verilmektedir.



Şekil 5.29 : Basınç dayanımının hava miktarı ile değişimi.

Mekanik özelliklerin taze beton hava miktarı ile değişimleri Şekil 5.30’da verilmektedir. Hava miktarının artmasıyla mekanik özelliklere ait değerler azalmıştır. Bu azalma en fazla yarmada çekme dayanımlarında elde edilmiştir. Farklı hava sürükleyicilerin kullanıldığı karışımlarda, bu durumun dışında belirgin bir davranış görülmemiştir. Bunların nedeni olarak hava sürükleyici katkıların kimyasal esaslarının mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

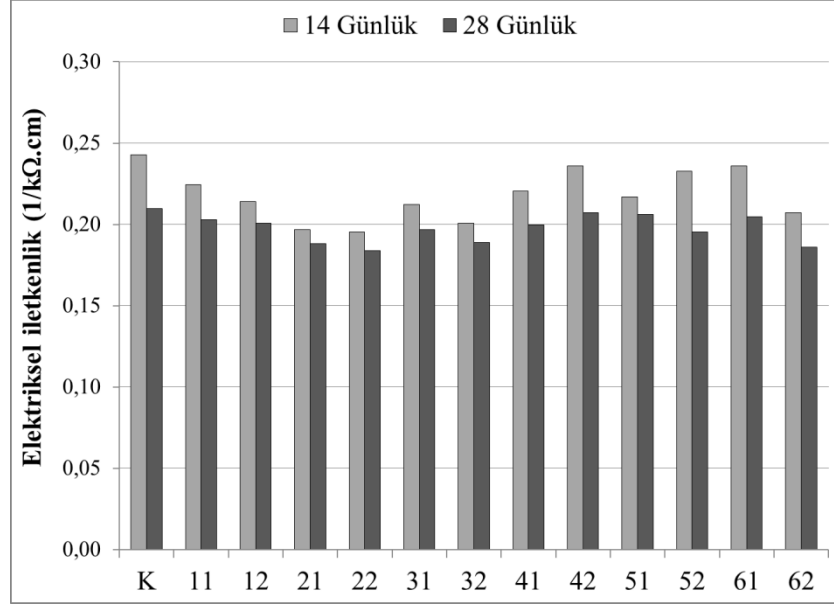


Şekil 5.30 : Mekanik özelliklerin hava miktarı ile değişimi.

5.3.5.5 İletkenlik özellikleri deneyleri

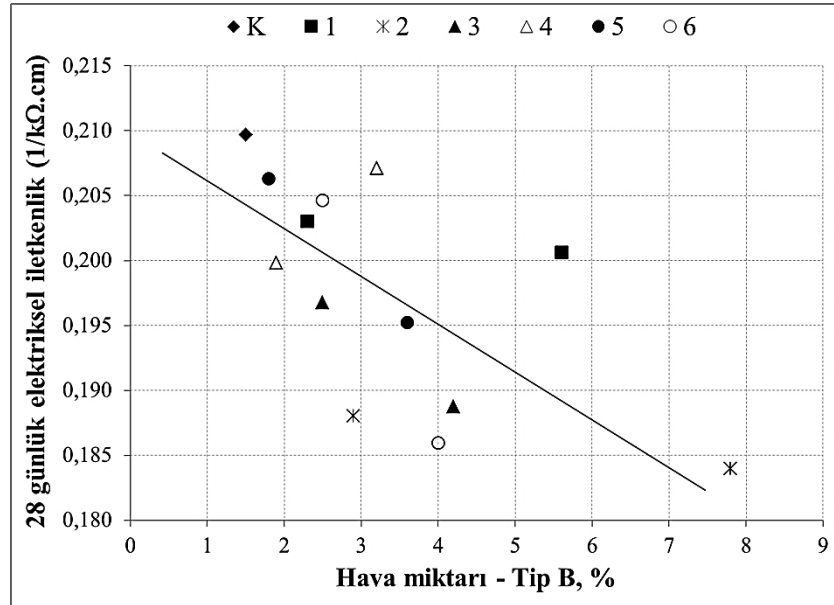
Elektriksel iletkenlik:

Karışımlara ait 14 ve 28 günlük elektriksel iletkenlik değişimleri Şekil 5.31’de verilmektedir.



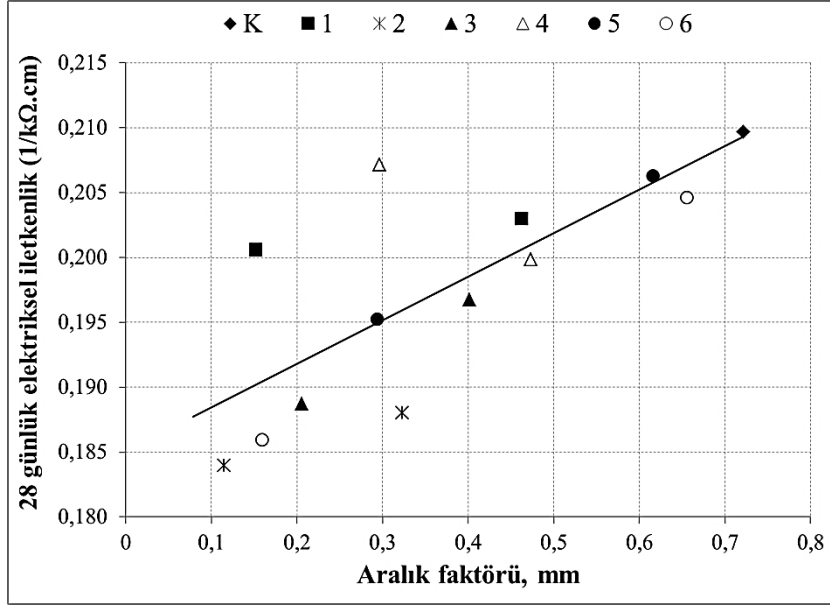
Şekil 5.31 : Karışımlara ait elektriksel iletkenlik değerleri.

Beton yaşının artmasıyla tüm karışımlarda elektriksel iletkenlik değerleri düşmüştür. Hava miktarına göre elektriksel iletkenlikteki değişimler Şekil 5.32’de verilmektedir.

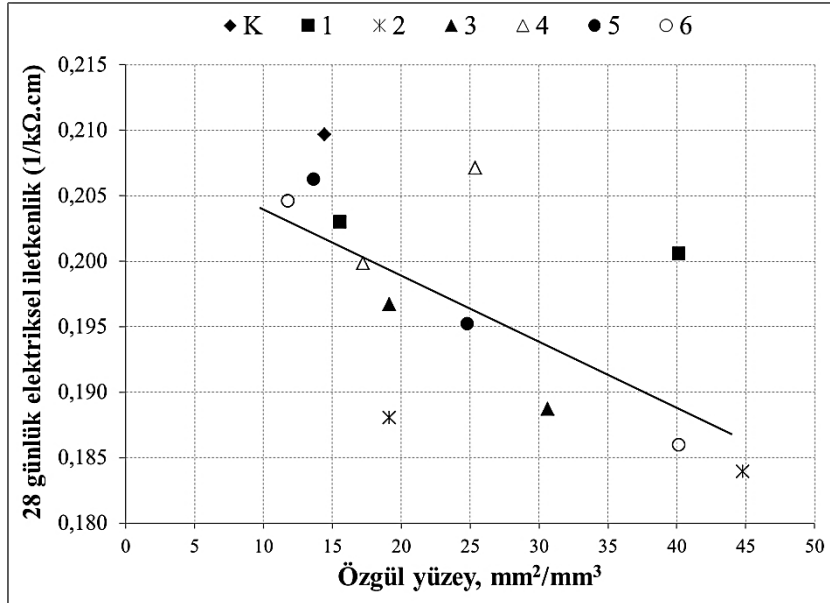


Şekil 5.32 : Elektriksel iletkenliğin hava miktarı ile değişimi.

Genel olarak hava miktarının artmasıyla elektriksel iletkenlik değerleri azalmıştır. Karışımlara ait 28 günlük elektriksel iletkenlik değerlerinin aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri ile ilişkisi Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te verilmektedir. Aralık faktörünün artmasıyla elektriksel iletkenlik artmış, boşlukların özgül yüzeyinin artmasıyla elektriksel iletkenlik azalmıştır. Hava sürükleyici katkının kimyasal esasının elektriksel iletkenlik üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.



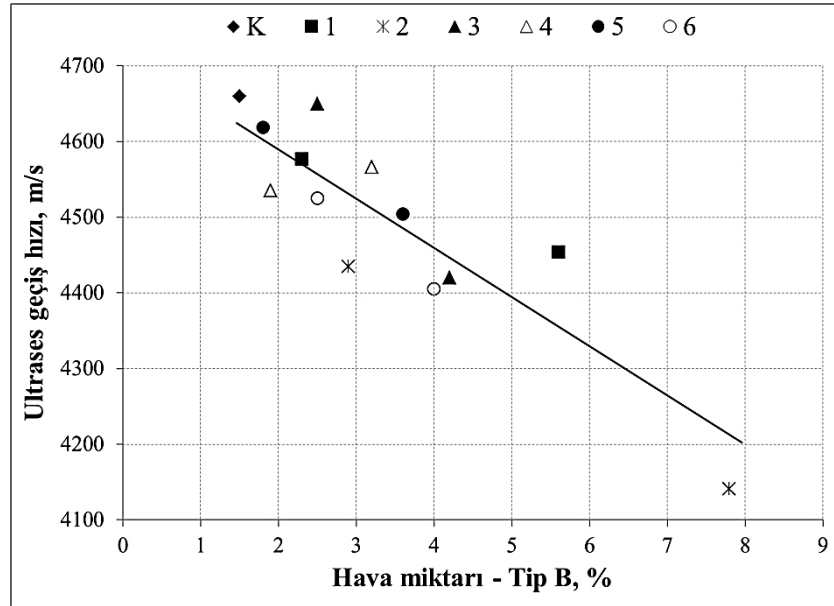
Şekil 5.33 : Elektriksel iletkenlik ile aralık faktörü ilişkisi.



Şekil 5.34 : Elektriksel iletkenlik ile özgül yüzey ilişkisi.

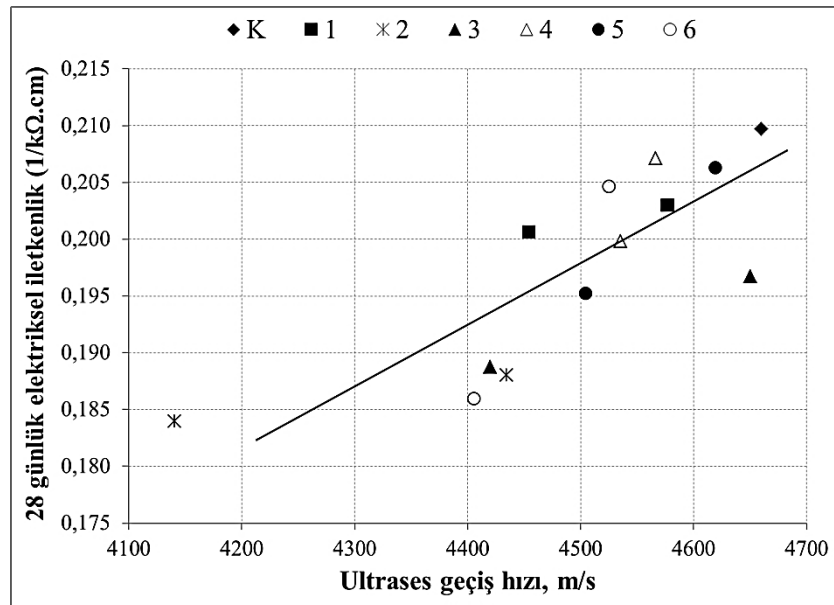
Ultrases geçiş hızı:

Ultrases geçiş hızının hava miktarı ile değişimi Şekil 5.35'te verilmektedir.



Şekil 5.35 : Ultrases geçiş hızının hava miktarı ile değişimi.

Hava miktarının artmasıyla ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Hava sürükleyici katkının kimyasal esasının ultrases geçiş hızı üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. Ultrases geçiş hızı elektriksel iletkenlik ilişkisi Şekil 5.36'da verilmektedir. İletkenlik deney sonuçları arasında yüksek bir korelasyon ($R=0,79$) elde edilmiştir.

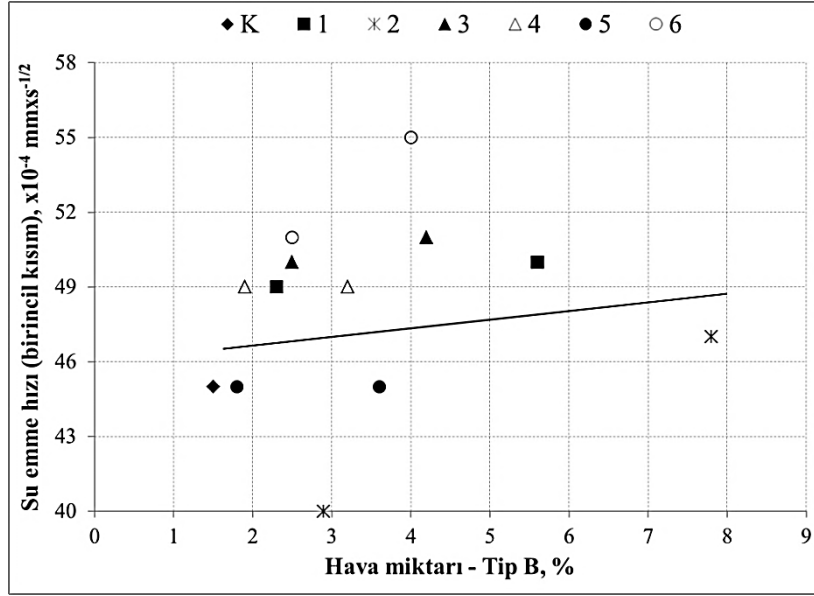


Şekil 5.36 : Ultrases geçiş hızı – elektriksel iletkenlik grafiği.

5.3.5.6 Geçirimsizlik özellikleri deneyleri

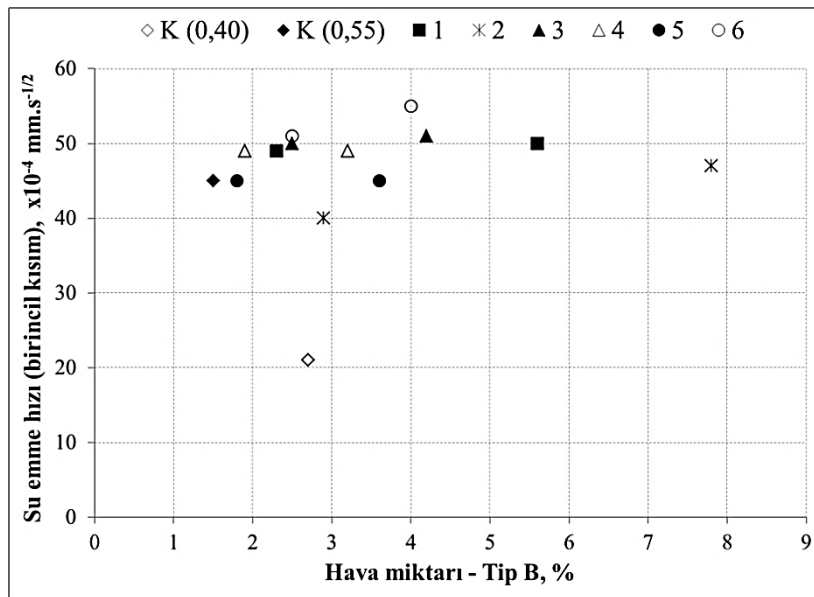
Kılcal geçirimsizlik:

Kılcal geçirimsizlik deneyi sonucu birincil kısım için hesaplanan su emme hızının hava miktarı ile değişimi Şekil 5.37’de verilmektedir.



Şekil 5.37 : Su emme hızının hava miktarı ile değişimi.

Sonuçlardan, su emme hızı üzerinde hava miktarının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Altıncı bölümde yapılan çalışmada üretilen ve bu çalışmadaki malzemelerin kullanıldığı S/Ç oranı 0,40 olan beton üzerindeki deney sonucu da değerlendirildiğinde Şekil 5.38 elde edilmiştir.

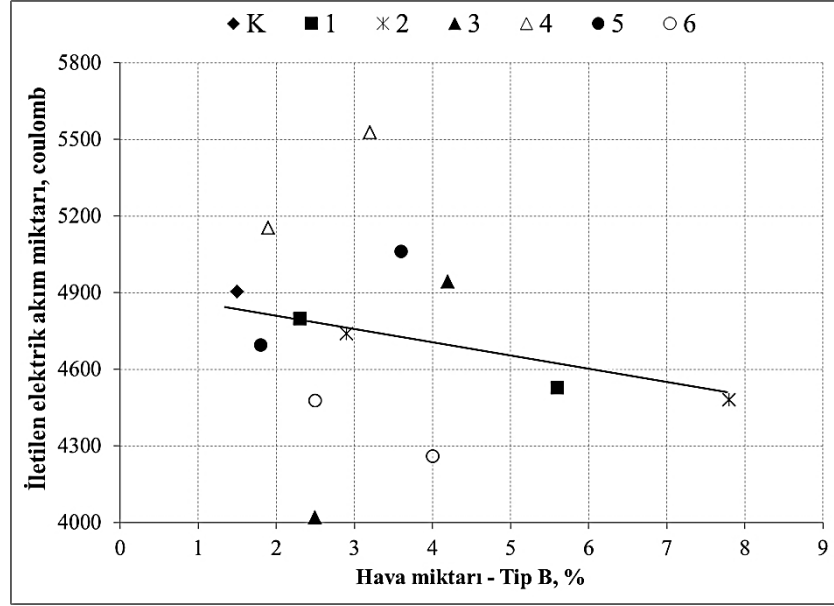


Şekil 5.38 : Su emme hızına hava miktarı ve S/Ç oranının etkisi.

Sonuçlar incelendiğinde su emme hızı üzerinde asıl etkinin betonun geçirimsizliği olduğu ve hava miktarının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyi:

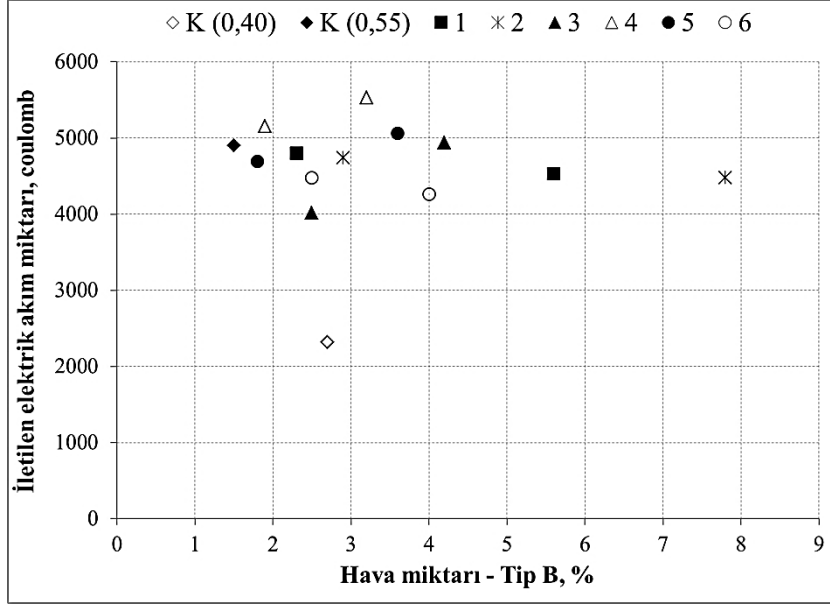
Deney sonucu hesaplanan, iletilen elektrik akımı miktarı değerinin hava miktarı ile değişimi Şekil 5.39 verilmektedir.



Şekil 5.39 : İletilen elektrik akımı miktarının hava miktarı ile değişimi.

Grafikten iletilen akım miktarı ile hava miktarı arasında zayıfta olsa bir ilişki olduğu görülmektedir. Deneyin elektriksel bir yöntem olması nedeniyle sonuçlar elektriksel iletkenlik sonuçları ile bereber değerlendirildiğinde hava miktarının artmasıyla az da olsa iletilen akım miktarının azaldığı söylenebilir. Su/çimento oranı aynı olan karışımlarda bu azalmanın değerlendirilmesi 6. Bölümde yapılan çalışmada üretilen ve bu çalışmadaki malzemelerin kullanıldığı S/Ç oranı 0,40 olan beton üzerindeki deney sonucu da dikkate alınarak yapılabilir (Şekil 5.40).

Kılcal geçirimsizlik ve elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyleri sonucunda hava sürükleyici katkının kimyasal esasının geçirimsizlik üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 5.40 : İletilen elektrik akımı miktarına hava miktarı ve S/Ç oranının etkisi.

Sonuçlar incelendiğinde geçen yük miktarı üzerinde asıl etkinin betonun geçirimsizliği olduğu ve hava miktarının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

5.3.6 Sonuçlar

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

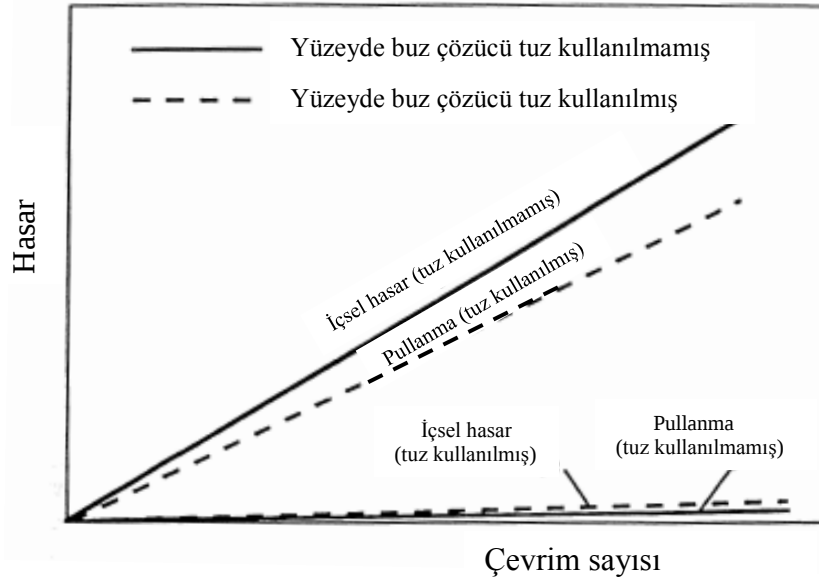
- 1) Betonların taze halde hava miktarları, hava ölçerler kullanılarak birim ağırlık yöntemine kıyasla daha doğru biçimde belirlenmiştir. Ancak birim ağırlık yöntemi, betonların hava sürükleyip sürüklediğinin kontrolünde ve hava miktarı kıyaslamalarında bir yöntem olarak kullanılabilir.
- 2) Numune alınırken yapılan işlemler sırasında hapsolmuş hava boşlukları oluşmamaktadır. Bu nedenle, sertleşmiş beton kesitlerinde yapılan analizler sonucu hesaplanan hava miktarları taze betonlarda ölçülen hava miktarlarından (özellikle %2,5'den yüksek hava miktarlarında) daha düşük elde edilmiştir.
- 3) Betonların donma-çözülme dayanıklılıklarının tahmininde hava miktarı değeri tek başına yanıltıcı olabilmektedir. Sertleşmiş betonda yapılan hava boşluğu sistemi analizlerinde kesite giren hapsolmuş hava boşluğu, hava miktarının olduğundan farklı hesaplanmasına neden olurken, aralık faktörü ve özgül yüzey hesaplarına kayda değer bir etki yapmamaktadır.

- 4) Donma-çözölme çevrimleri NaCl çözeltisinde yapıldığından buz çözölcü tuz etkisiyle pullanma hasarı içsel hasara göre daha baskın çıkmıştır.
- 5) Hava miktarının artmasıyla mekanik özelliklere ait değerler beklendiğı üzere azalmıştır. Hava sürükleyici katkıların kimyasal tanımlarının mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.
- 6) Hava boşluğu sistemi parametreleri ultrases geçiş hızı ve elektriksel iletkenlik üzerinde benzer etki göstermiştir. Genel olarak elektriksel iletkenlik değerleri aralık faktörünün artmasıyla artmış, hava miktarının ve boşlukların özgül yüzeyinin artmasıyla azalmıştır.
- 7) Betonların kılcal su geçirimliliğı ve klorür geçirimliliğı üzerinde hava miktarı ve diğer hava boşluğu sistemi parametrelerinin belirgin bir etkisinin olmadığı asıl etkenin betonunun geçirimliliğı olduğu sonucuna varılmıştır.
- 8) Ticari katkılarla yapılan donma-çözölme deneylerinde tüm katkılarla yeterli hava boşluğu sistemi oluşturulabilmiş ve yeterli donma-çözölme dayanıklılığı sağlanmıştır. Bu araştırma kapsamında, hava boşluğu sistemi yeterli ise donma-çözölme hasarının hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olduğu anlaşılmıştır.

6. DENEY KOŞULLARININ DONMA-ÇÖZÜLME HASARINA ETKİSİ

6.1 Giriş

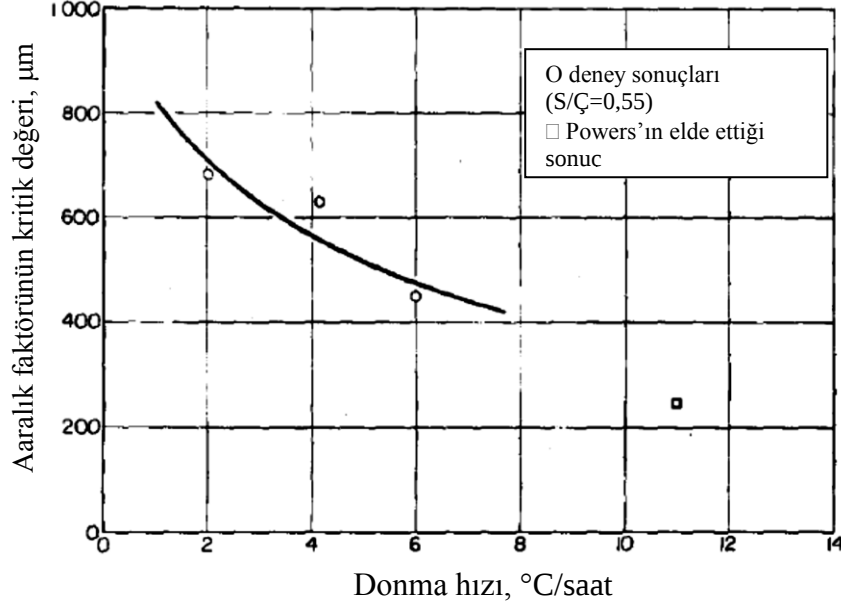
Beton yapılarda donma-çözülme etkisi altında, boşluklarındaki suyun donarak hacminin artması sonucu, dayanımdaki azalma ile oluşan içsel hasar ve yüzeyinde zayıf parçaların dökülmesi sonucu oluşan pullanma olmak üzere iki tip hasar görülmektedir. Yüzeyde buz çözücü tuz kullanılması durumunda pullanma hasarı aksi durumda içsel hasar baskın olarak gerçekleşmektedir (Şekil 6.1, Fagerlund, 1995).



Şekil 6.1 : Buz çözücü tuz kullanılması durumuna göre donma-çözülme hasarları (Fagerlund, 1995).

Hasarın oluşumu üzerinde donma hızının etkisi farklı hipotezlerin öne sürülmesine neden olmuştur. Powers'ın (1949) hidrolik basınç hipotezinde donma hızının artması hasarı arttırıcı bir parametre olarak yer almıştır. Powers ve Helmuth (1953) yaptıkları deneysel çalışmada hava sürüklenmiş betonlarda donma-çözülme etkisi altında hacim artışı yerine büzülme elde edince osmotik basınç hipotezi veya mikroskobik buz kristalleri gelişmesi olarak bilinen yeni bir hipotez öne sürmüşlerdir. Bu hipotezde ise donma hızı düştükçe hasar artmaktadır. Powers bu ikinci hipotezinde

hidrolik basınç hipotezinin deneysel sonuçlara dayanmadığını ve mantıksal çıkarımlara dayanarak ileri sürüldüğünü açıklamıştır. Pigeon ve diğ., (1985) donma hızının etkisini araştırdığı çalışmasında deneysel olarak donma hızının etkisini ortaya koymuş ve Powers'ın hidrolik basınç hipotezindeki teorik sonucu ile karşılaştırmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 : Kritik aralık faktörünün donma hızı ile değişimi (Pigeon, 1985).

Grafikten, hasar oluşmaması için, donma hızının artmasıyla daha düşük aralık faktörü gerektiği görülmektedir. Bu çalışmalarda buz çözücü tuz kullanılmamıştır ve oluşan hasar içsel donma-çözülme hasarıdır. Buz çözücü tuzun kullanıldığı farklı bir çalışmada ise donma hızının düşmesi pullanma hasarını, artması ise içsel hasarı arttırmıştır (Jacobsen ve diğ., 1997). İncelenen çalışmalarda donma hızının, buz çözücü tuz kullanılması durumuna göre farklı etki ettiği görülmüştür.

6.2 Çalışmanın amacı ve kapsamı

Çalışmada, farklı donma hızlarına, minimum sıcaklıkta bekleme sürelerine, don altında geçen zamana ve dolayısıyla çevrim sürelerine sahip deney koşullarının donma-çözülme hasarları üzerindeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla hava sürüklenmiş ve hava sürüklenmemiş betonlar en şiddetli don ortamı olan buz çözücü tuz çözeltisinin uygulandığı bir deneye tabi tutulmuştur. Hava sürüklenmiş betonlarda farklı katkıları kullanılmış ve katkıların kimyasal esaslarının ve

oluşturdukları hava boşluğu sistemlerinin bu deney koşullarındaki performansları araştırılmıştır.

6.3 Deneysel Çalışma

6.3.1 Kullanılan malzemeler

6.3.1.1 Çimento

CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Bölüm 3'te (Çizelge 3.2) verilmiştir.

6.3.1.2 Agregalar

Bölüm 5'te yapılan deneysel çalışmada kullanılan agregalar bu çalışmada da kullanılmıştır. Agregalara ait elek analizi sonuçları Çizelge 5.2'de ve fiziksel özellik deney sonuçları Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

6.3.1.3 Hava sürükleyici katkıları

Bu bölümde yapılan çalışmada özellikleri ve kodları Çizelge 3.4'te verilen hava sürükleyici katkılardan kolofon reçinesi esaslı (no:2), yağ alkolü türevi esaslı (no:4) ve sentetik esaslı (no:6) katkıları kullanılmıştır.

6.3.2 Beton karışımı tasarımları

İki farklı S/Ç oranında hava sürüklenmiş ve hava sürüklenmemiş betonlar üzerinde deney koşullarının hasar üzerine etkileri araştırılmıştır. TS EN 206-1'de donma-çözülme etkisi altındaki betonlarda önerilen en yüksek S/Ç değeri olan 0,55 oranında hava sürükleyici katkıları kullanılarak farklı hava boşluğu sistemine sahip betonlar üretilmiştir. Bir diğer S/Ç oranı 0,40'da ise hava sürüklenmiş özellikte bir beton üretilmemiştir.

6.3.2.1 Agregalar karışım granülometrisi

Doğal kum' un %24, kırma kum' un %26, kırma taş I' in %30 ve kırma taş II' nin %20 oranında kullanılmasıyla elde edilen karışıma ait granülometri eğrisi Bölüm 5'te (Şekil 5.1) sunulmuştur.

6.3.2.2 Beton bileşimi ve malzeme miktarları

Çimento miktarının sabit olduğu karışımlarda S/Ç oranı ve hava miktarları değişmektedir. Hava sürükleyici katkı kullanılmayan karışımlarda karışım kodları 0,40 ve 0,55 S/Ç oranlarını ifade edecek biçimde sırasıyla 40 ve 55 olarak belirlenmiştir. Hava sürüklenmiş betonlarda, S/Ç oranı ve betonun hava sürüklenmiş olduğu belirtilmiştir. Karışım kodları ve açıklamaları Çizelge 6.1’de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Karışım kodları.

Karışım kodu	S/Ç oranı	Kullanılan HSK’nın kimyasal esası
40	0,40	HSK kullanılmamıştır
55	0,55	HSK kullanılmamıştır
55A1	0,55	Kolofon reçinesi
55A2	0,55	Yağ alkolü türevi
55A3	0,55	Sentetik

Düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu karışımda polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı özellikte yenil nesil bir süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak diğer karışımlarla aynı çimento miktarına sahip ve aynı kıvam sınıfında bir karışım elde edilmiştir. Beton bileşimleri Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Beton bileşimleri.

Karışım kodu	Çimento kg/m ^{3*}	Su kg/m ³	Doğal kum kg/m ³	Kırma kum kg/m ³	Kırma taş I kg/m ³	Kırma taş II kg/m ³	HSK kg/m ³	SA kg/m ^{3**}	Hava miktarı %
40	357	143	449	500	584	391	-	3,57	2,7
55	357	196	425	473	553	370	-	-	1,5
55A1	357	196	415	463	541	362	0,228	-	3,0
55A2	357	196	409	456	532	356	0,164	-	4,0
55A3	357	196	404	450	526	352	0,082	-	4,8

*Değişen hava hacmine bağlı olarak agrega miktarı değişmekle birlikte, çimento miktarı sabit tutulmuştur.

** Çimentonun ağırlıkça %1’i miktarınca kullanılmıştır. Katkının katı madde miktarı %35’dir.

6.3.2.3 Üretim, taze beton deneyleri ve numune alma işlemleri

Karışımlar 5.3.2.3’te açıklanan yöntemle göre hazırlanmıştır.

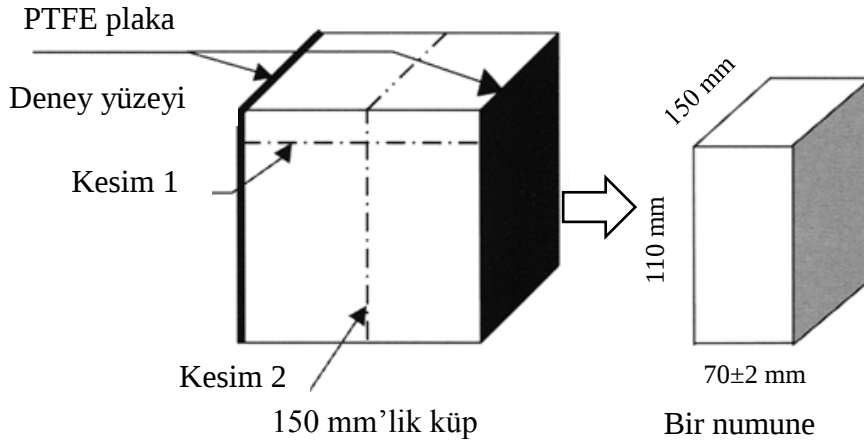
6.3.3 Deneyel yöntemler

6.3.3.1 CIF deneyi

CIF deneyi (Kapiler su emme, İçsel hasar ve Donma-çözülme deneyi) RILEM TC 176-IDC: “Internal Damage of Concrete due to the frost action” teknik komitesince hazırlanmış bir donma-çözülme deneyidir. TSE CEN/TR 15177 standardında içsel

hasarın belirlenmesine yönelik bir donma-çözülme deney yöntemi olarak yer almaktadır. RILEM tarafında önerilen CIF deneyi ile TSE CEN/TR 15177'de yer alan CIF deneyi arasında numune boyutları, uygulanan deneyler gibi farklılıklar bulunmaktadır. Çalışma kapsamında RILEM CIF deneyi uygulanmıştır.

Numunelerin hazırlanması: RILEM CIF deneyinde 150 mm'lik küp kalıpların karşılıklı iki kenar yüzeyine PTFE (politetrafloroetilen) plaka konularak kalıp doldurulur daha sonra numuneler 7 günlük olunca döküm yüzeyinde 4 cm kesilip atılarak ve orta noktadan ikiye kesilerek numuneler elde edilir (Şekil 6.3). TSE CEN/TR 15177'de ise 150 mm'lik küp kalıpların PTFE (politetrafloroetilen) levha ile ortadan ikiye ayrılması ile numuneler elde edilir (Şekil 5.5). PTFE plakaya temas eden yüzey deney yüzeyidir. Bu nedenle PTFE plakaya kalıp yağı sürülmemelidir.



Şekil 6.3 : Numune boyutları ve elde edilişi.

Deney öncesinde numunelerin hazırlığı için gerekli işlemler aşağıdaki sırayla yapılır.

- Taze beton, kalıplara yerleştirildikten sonra kalıplar polietilen örtü ile kaplanarak 1 gün süreyle kurumaya karşı korunurlar. Hava sıcaklığı 20 ± 2 °C olmalıdır.
- 24 ± 2 saat sonra, numuneler kalıplardan çıkarılır ve 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip şebeke suyu ile doldurulmuş bir kür havuzuna yerleştirilir.
- Numuneler 7 günlükken kür havuzundan çıkarılır, boyutları kesilerek ayarlanır ve donma-çözülme deneyi başlayana kadar 21 gün süreyle 20 ± 2 °C ve $\% 65 \pm 5$ bağıl neme sahip kür odasına konulur.
- Taze betonun kalıplara yerleştirilmesinden itibaren geçen 21. ve 26. günler arasında, yanal yüzeyler, bütül kauçuk ile yapıştırılmış alüminyum folyo veya uygun bir epoksi kullanılarak kaplanır.

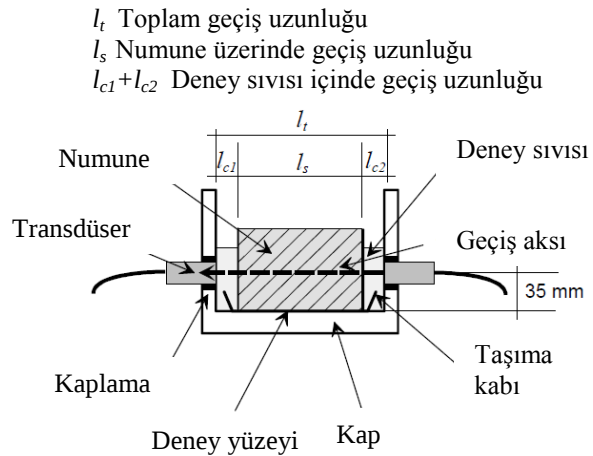
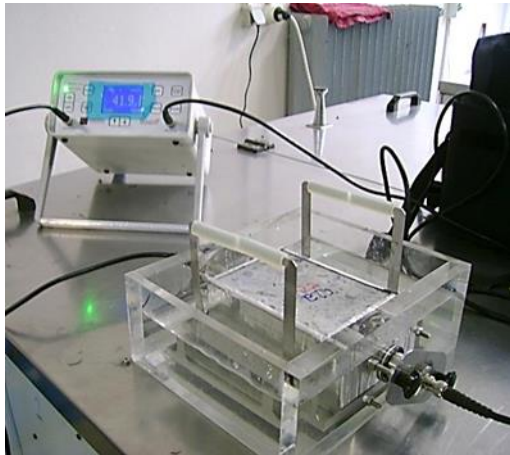
Deney işlemi: Numuneler 28 günlük olduktan sonra 7 gün boyunca kapiler olarak deney sıvısı (kütlece %97 musluk suyu ve %3 NaCl) emdirilerek doymun hale getirilir. Deney sıvısı emdirme işlemi kapalı kapta yapılır ve su yüksekliği aralıklarla kontrol edilir. Numuneler 35 günlük olunca donma-çözölme çevrimlerinin yapılacağı kabine konularak deneye başlanır.

Ölçümler: RILEM CIF deneyinde her 4. veya 6. çevrimde ölçümlerin yapılabileceği belirtilirken maksimum çevrim sayısı kısıtlanmamıştır. TSE CEN/TR 15177’de ise ölçümlerin (7 ± 1) ., (14 ± 1) ., (28 ± 1) ., (42 ± 1) . ve 56. çevrimlerde yapılması belirtilmektedir.

a. Pullanma miktarının ölçülmesi: Pullanma miktarı Bölüm 5’te (5.3.3.3) anlatılan CDF deneyindeki gibi ölçülmektedir. Farklı olarak sadece, ultrases ölçümünden sonra taşıma kabına dökülen malzeme varsa tekrar kaba konur ve diğer dökülen malzemelerle filtre edilir.

b. Su emme miktarının ölçülmesi: Numune yüzeyinden dökülen malzemeler alındıktan sonra numune kenar yüzeyleri havlu ile kurulanır daha sonra 0,1 g hassasiyetle tatılır.

c. Ultrases geçiş hızının ölçülmesi: Ultrases ölçümleri bir kap içinde yapılmaktadır. Numune taşıma kabıyla birlikte kaba konulur daha sonra kap numunenin üst yüzeyini ıslatmayacak ve transdüserlerden 10 mm yüksekte olacak şekilde deney sıvısı ile doldurulur. Deney öncesinde ultrases ölçüm cihazının kalibrasyonu yapılmalıdır. Ultrases geçiş hızı ölçümlerine ait açıklamalar Şekil 6.4’te verilmektedir.



Şekil 6.4 : Ultrases geçiş hızı ölçümü.

Hesaplamalar:

a. Pullanma: Pullanma miktarı Bölüm 5'te (5.3.3.3) açıklanan CDF deneyindeki gibi belirlenmektedir.

b. Su emme: Su emme değerleri aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$\Delta W_n = \frac{W_n - W_1 + \sum \mu_s}{W_0} \times 100 \quad (6.1)$$

Burada,

ΔW_n : n adet donma-çözülme çevrimi sonunda numunenin su emmesi, %.

W_n : n adet donma-çözülme çevrimi sonunda numunenin kütlesi, g.

W_1 : 28. gün başlatılan doygunlaştırma işleminden önce numunenin kaplanmış olarak tartılan kütlesi, g.

μ_s : n adet donma-çözülme çevrimi sonunda pullanan malzemenin yığışımli kütlesi, g.

W_0 : 28. gün başlatılan doygunlaştırma işleminden önce numunenin kaplanmamış olarak tartılan kütlesi, g.

c. Bağlı dinamik elastisite modülü (BDEM): BDEM aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$t_c = \frac{l_c}{v_c} \quad (6.2)$$

Burada,

t_c : Deney sıvısındaki geçiş süresi.

l_c : Deney sıvısındaki ölçüm uzunluğu, $l_{c1} + l_{c2}$.

v_c : Deney sıvısındaki ultrasonik sinyal geçiş hızı, su için $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 'de 1490 m/s alınır.

$$\tau_n = \frac{t_{cs} - t_c}{t_n - t_c} \quad (6.3)$$

Burada,

τ_n : Bağlı geçiş süresi.

t_{cs} : Kapiler su emmeden (cs) sonra ilk çevrimden önce ölçülen toplam geçiş süresi, ms (mikro saniye).

t_n : n çevrim sonunda ölçülen toplam geçiş süresi, ms.

$$R_{u,n} = \tau_n^2 \quad (6.4)$$

$R_{u,n}$: Bağıl dinamik elastisite modülü (Hasar kriteri: $R_{u,n} < 0.8$ (%80) ise).

6.3.3.2 Düzlem kesit analizleri

Donma-çözülme etkisine maruz kalan numunelerden kesit alınırken kesme işleminde parçalanmaması, çatlak oluşmaması veya mevcut çatlaklarının genişlememesi için numunelere vakum altında epoksi emdirilir (Şekil 6.5).



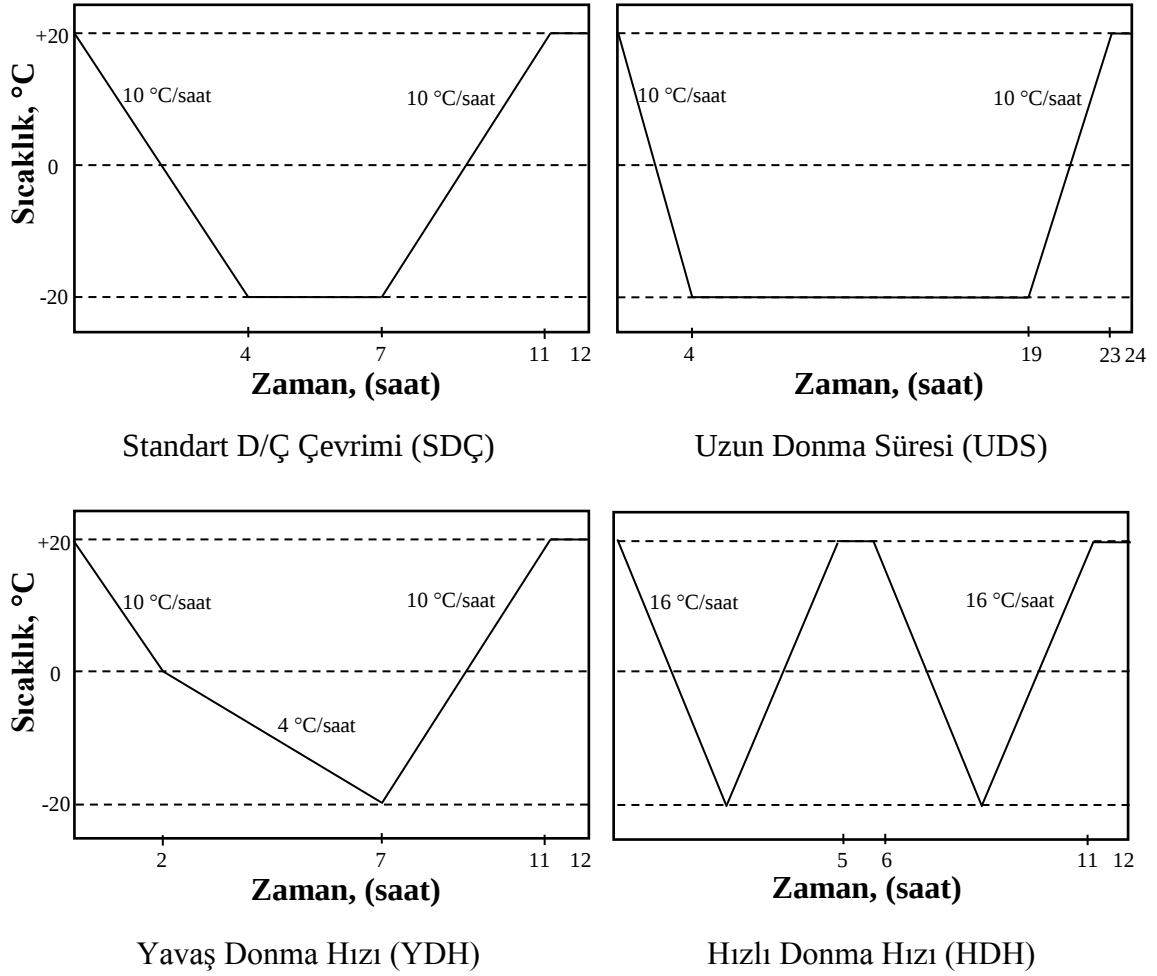
Şekil 6.5 : Donma-çözülme numunelerine epoksi emdirilmesi.

Numuneler epoksi emdirildikten sonra ortadan kesilip, herhangi bir parçadan yaklaşık 2,5 cm kalınlığında dilim alınır. Alınan 15x7x2,5 cm'lik kesit, içindeki mevcut tüm boşluk ve mikroçatlakların doldurulması amacıyla vakum altında florasan tozu içeren yüksek akışkanlıktaki bir sıvı epoksi içinde bekletilir. Daha sonra beton yüzeyi 1 mm aşındırılarak düzlem haline getirilip ve fotoğraflanır. Fotoğraflama işlemi doğal ışık ve UV-ışık altında yapılır. UV-ışık altında ise yüzeyden 1 mm aşağıya inen boşluklar içindeki florasan tozu nedeniyle parlama görülmektedir. Aşındırma işlemi 2 mm aşağıya kadar devam ettirilerek UV-ışık altında yapılan fotoğraflama ile 1 mm de görülen boşluk ve çatlak yapısının alt tabakalara doğru inip inmediği tesbit edilebilmektedir.

6.3.4 Uygulanan deney koşulları

Çalışmanın amacı olan deney koşullarının donma-çözülme hasarı üzerine etkisi, CIF deneyinde yer alan standart çevrim de dahil uygulanan farklı donma hızlarına, don altında bekleme sürelerine ve dolayısıyla çevrim sürelerine sahip donma-çözülme

çevrimleri ile araştırılmıştır. Deney koşullarına ait sıcaklık-zaman eğrileri Şekil 6.6’da sunulmaktadır.



Şekil 6.6 : Standart D/Ç çevrimi ve farklı deney koşullarına ait sıcaklık-zaman grafikleri.

Standart D/Ç çevrimi ve farklı deney koşullarına ait bazı özellikler Çizelge 6.3’te verilmektedir.

Çizelge 6.3 : Standart D/Ç çevrimi ve farklı deney koşullarına ait bazı özellikler.

Donma-çözülme çevrimi	Donma hızı, (°C/saat)	0 °C’nin altında geçen süre, (saat)	-20 °C’de bekleme süresi, (saat)	Çevrim süresi, (saat)
Standart D/Ç çevrimi (SDÇ)	10	7	3	12
Uzun donma süresi (UDS)	10	19	15	24
Yavaş donma hızı (YDH)	4	7	0	12
Hızlı donma hızı (HDH)	16	2,5	0	6

6.3.5 Deney sonuçları

Farklı deney koşullarının donma-çözülme hasarı üzerindeki etkileri hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş betonlar üzerinde 6.3.3.1’de anlatılan CIF deneyi ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır. Hasara uğramış numuneler üzerinde 6.3.3.2’de anlatılan yöntemle düzlem kesit analizleri yapılmış ve farklı deney koşulları altında oluşan çatlaklar incelenmiştir. Düzlem kesit görüntüleri deney sonuçlarının değerlendirmeleri bölümünde sunulmaktadır.

6.3.5.1 Taze beton deney sonuçları

Beton karışımları her bir deney koşulu için farklı zamanlarda tekrar üretilmiştir yani her bir karışım 4 defa üretilmiştir. Bu nedenle taze beton deneylerine ait sonuçlar 4 üretim değerinin ortalamasıdır. Taze beton deneylerine ait sonuçlar Çizelge 6.4’te verilmektedir.

Çizelge 6.4 : Taze beton deneylerine ait sonuçlar.

Kod	Çökme, cm		Birim ağırlık, kg/m ³			Hava miktarı (ASTM C 231-B), %	
	Ortalama	Stand. Sapma	Teorik	Ortalama	Stand. Sapma	Ortalama	Stand. Sapma
40	5,4	0,25	2428	2433	1,77	2,7	0,06
55	5,1	0,25	2374	2381	11,4	1,5	0,00
55A1	6,8	0,50	2334	2337	11,3	3,0	0,14
55A2	8,0	0,58	2307	2305	2,60	4,0	0,13
55A3	8,6	0,48	2285	2281	8,45	4,8	0,13

Betonlar, tasarım aşamasında hedeflenen kıvam sınıfını (S2, 5-10 cm) sağlamıştır. Malzemeler, bir gün öncesinde laboratuvara konulmuş ve üretimler 21±2 °C’de laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece tüm karışımlarda sıcaklık 21±1 °C elde edilerek, sıcaklığın sonuçlar üzerindeki etkisi azaltılmıştır.

6.3.5.2 Hava boşluğu sistemi analizleri

Hava boşluğu sistemi parametreleri 5.3.3.2 açıklanan yöntemle belirlenmiştir. Betonlara ait hava boşluğu sistemi parametreleri Çizelge 6.5’te sunulmaktadır. Hava boşluğu sistemi parametrelerine ek olarak analiz sonucu hesaplanan boşluk frekansı, ortalama kiriş uzunluğu ve hamur/hava oranı değerleri de Çizelge 6.5’te sunulmaktadır.

Çizelge 6.5 : Hava boşluğu sistemi parametreleri.

Kod	Hava miktarı %	Özgül yüzey mm^2/mm^3	Aralık faktörü mm	Boşluk frekansı mm^{-1}	Ort., giriş uzunluğu mm	Hamur/hava oranı
40	3,5	15,4	0,380	0,125	0,300	8,73
55	1,4	10,6	0,805	0,035	0,412	21,8
55A1	2,4	29,1	0,235	0,201	0,170	12,0
55A2	2,75	36,2	0,198	0,276	0,096	11,1
55A3	3,5	42,5	0,154	0,390	0,091	8,76

6.3.5.3 Donma-çözülme deneyi sonuçları

Donma-çözülme deneyleri 6.3.3.1’de açıklanan CIF deneyine göre yapılmıştır. Her bir karışımdan üçer numune üzerinde yapılan donma-çözülme deneylerine ait sonuçlar Çizelge 6.6’da verilmektedir.

Çizelge 6.6 : Donma-çözülme deneyi sonuçları.

Don Koş.	Karış. Kodu	Pullanma, kg/m^2				Su emme, %				BDEM*			
		Çevrim sayısı				Çevrim sayısı				Çevrim sayısı			
		4	6	14	28	4	6	14	28	4	6	14	28
Standart Donma Çevrimi (SDÇ)	40	0,08	0,22	0,96	2,95	0,85	0,90	1,16	1,53	0,99	1,00	0,98	0,97
	55	0,57	1,14	4,12	13,3	1,68	1,79	2,54	3,97	1,00	1,00	0,81	0,00
	55A1	0,10	0,20	0,63	1,36	1,63	1,75	2,24	2,75	1,00	1,00	1,01	1,01
	55A2	0,07	0,13	0,31	0,67	1,88	2,01	2,52	2,94	1,00	1,00	1,00	1,01
	55A3	0,05	0,08	0,21	0,47	1,85	1,95	2,44	2,89	1,00	1,00	1,00	1,01
Uzun Donma Süresi (UDS)	40	0,02	0,07	1,05	3,06	0,63	0,71	0,93	1,10	1,00	1,00	1,02	1,00
	55	0,29	1,59	6,48	16,5	1,36	1,50	2,84	3,73	1,00	0,99	0,59	0,00
	55A1	0,14	0,21	0,58	1,24	1,40	1,58	2,13	2,52	1,00	1,01	1,01	1,02
	55A2	0,04	0,06	0,20	0,45	1,27	1,40	1,89	2,42	1,01	1,02	1,03	1,03
	55A3	0,02	0,03	0,10	0,26	1,47	1,63	2,14	2,55	1,01	1,02	1,03	1,04
Yavaş Donma Hızı (YDH)	40	0,01	0,01	0,16	1,02	0,64	0,69	0,98	1,27	1,01	1,02	1,01	1,01
	55	0,10	0,54	4,98	14,9	1,52	1,66	2,49	2,98	1,01	1,02	0,88	0,00
	55A1	0,02	0,04	0,24	0,97	1,45	1,55	2,05	2,65	1,01	1,01	1,01	1,02
	55A2	0,02	0,04	0,13	0,32	1,62	1,74	2,25	2,80	1,01	1,03	1,03	1,04
	55A3	0,01	0,03	0,09	0,18	1,73	1,85	2,36	2,97	1,02	1,03	1,03	1,05
Hızlı Donma Hızı (HDH)	40	0,01	0,02	0,16	0,70	0,71	0,76	0,94	1,07	1,01	1,03	1,03	1,00
	55	0,03	0,19	1,47	4,22	1,40	1,52	1,88	2,52	1,02	1,03	1,01	0,75
	55A1	0,02	0,03	0,07	0,15	1,50	1,60	1,92	2,24	1,01	1,02	1,03	1,01
	55A2	0,01	0,02	0,03	0,05	1,65	1,81	2,10	2,46	1,02	1,03	1,04	1,02
	55A3	0,01	0,01	0,03	0,03	1,66	1,74	2,05	2,38	1,02	1,03	1,04	1,02

*BDEM: Bağıl Dinamik Elastisite Modülü

6.3.5.4 Betonlar üzerinde yapılan diğer deneylere ait sonuçlar

Çalışma kapsamında, gerek donma-çözülme deney sonuçlarının ilişkilendirilmesi gerekse de 5. Bölümde yapılan çalışmaları destekleyici veriler elde etmek amacıyla, beton karışımlarının mekanik, iletkenlik ve geçirimsizlik gibi diğer beton özellikleri de yapılan deneylerle araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan mekanik özellik deneyleri Bölüm 5'te (Çizelge 5.9), deneylere ait sonuçlar ise Çizelge 6.7'de verilmektedir. Mekanik özellik deneyleri betonlar 28 günlükken yapılmıştır.

Çizelge 6.7 : Mekanik özellikler deney sonuçları.

Kod	Basınç dayanımı MPa	Elastisite modülü GPa	Yarma-çekme dayanımı, MPa
40	60,2	33,9	5,4
55	43,0	32,0	4,6
55A1	40,5	29,8	4,0
55A2	37,5	28,6	3,8
55A3	35,4	26,8	3,4

Elektriksel direnç ve ultrases geçiş süresi ölçümleri yapılarak, betonların elektriksel iletkenlik ve ultrases geçiş hızları hesaplanmıştır. Elektriksel direnç ölçümleri 5.3.3.4'te anlatılan yöntemle göre yapılmıştır. Elektriksel direnç ölçümleri, betonlar 14 günlükken 7, 28 günlükken 6 numune üzerinde yapılmıştır. Ultrases geçiş süresi ölçümleri ise numuneler 28 günlükken ve 3 numune üzerinde yapılmıştır. İletkenlik deneylerine ait sonuçlar Çizelge 6.8'de verilmektedir.

Çizelge 6.8 : İletkenlik deneyleri sonuçları.

Kod	Elektriksel iletkenlik 1/(kΩ.cm)		Ultrases geçiş hızı m/s
	14. Gün	28. Gün	
40	0,148	0,124	4950
55	0,230	0,205	4650
55A1	0,223	0,187	4560
55A2	0,223	0,187	4480
55A3	0,201	0,177	4440

Betonların geçirimsizlik özellikleri, kılcal su geçirimsizliği ve elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyleri ile araştırılmıştır. Deneyler 5.3.3.5'te anlatılan yöntemlere uygun olarak yapılmıştır. Kılcal su geçirimsizliği deneyi sonucunda hesaplanan, birincil ve ikincil su emme hızları ile elektriksel yöntemle klor iyonu geçişi deneyi

sonucu hesaplanan, iletilen elektrik akım miktarı değerleri Çizelge 6.9’da verilmektedir.

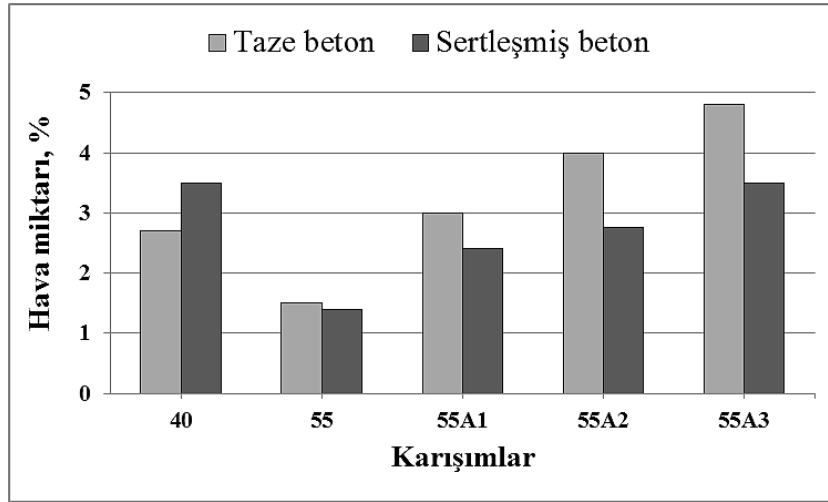
Çizelge 6.9 : Geçirimsizlik deneyleri sonuçları.

Kod	Su emme hızı $\times 10^{-4} \text{ mm}/\sqrt{s}$		İletilen elektrik akım miktarı, coulomb
	Birincil	İkincil	
40	21	4	2320
55	43	11	4910
55A1	51	11	4750
55A2	49	12	4440
55A3	54	13	4530

6.3.6 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

6.3.6.1 Hava boşluğu sistemi analizleri

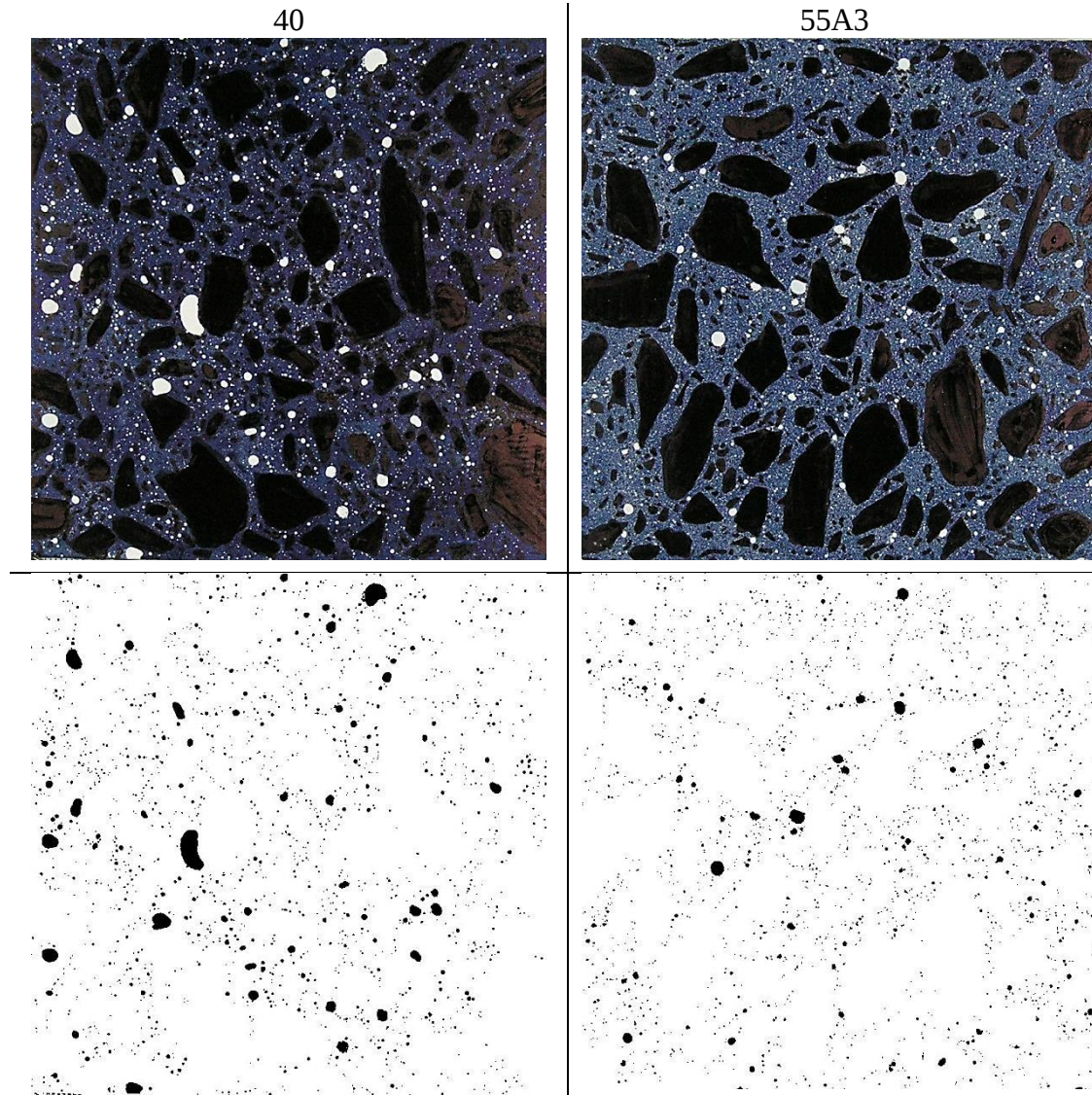
Sertleşmiş betonlar üzerinde yapılan hava boşluğu analizleri sonucu elde edilen ve taze halde hava ölçerle ölçülen hava miktarları Şekil 6.7’de verilmektedir.



Şekil 6.7 : Taze ve sertleşmiş beton hava miktarları.

Taze ve sertleşmiş betonlar üzerinde yapılan ölçümler sonucu farklı hava sürükleyici katkıların kullanıldığı 55A1, 55A2 ve 55A3 karışımlarında farklı hava miktarları elde edilmiştir. Düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu karışımda hava sürükleyici katkı kullanılmamasına karşın süperakışkanlaştırıcı katkının özeliğinden dolayı hava boşlukları oluşmuş ve taze halde hava sürüklenmiş betonlardan düşük, sertleşmiş halde ise en yüksek hava sürüklenmiş betonun hava miktarı kadar hava miktarına sahip bir beton karışımı elde edilmiştir.

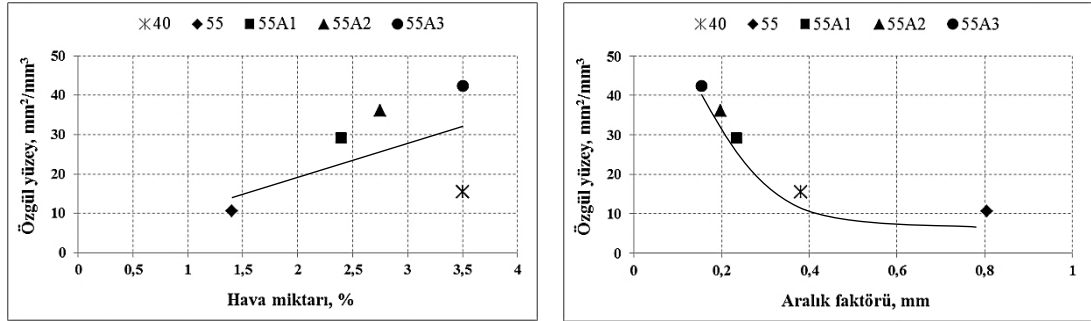
Hava sürüklenmiş betonlarda sertleşmiş halde yapılan analizler sonucu hesaplanan hava miktarları taze betonlarda ölçülen hava miktarlarından daha düşük çıkmıştır. Benzer durum 5. Bölümde yapılan çalışmada da gözlemlenmiş ve nedenleri 5.2.5.2’de tartışılmıştır. Düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu karışımda ise bu durumun tersi olarak sertleşmiş halde taze hale kıyasla daha yüksek hava miktarı elde edilmiştir. Bu sonuç, süperakışkanlaştırıcı katkı özeliği ile oluşmuş hava boşluklarına sahip 40 kodlu karışıma ait ve hava sürükleyici katkı kullanılarak oluşmuş hava boşluklarına sahip 55A3 kodlu karışıma ait beton kesitleri üzerinde irdelenmiştir (Şekil 6.8). Kesitlerin bir görüntü analizi programı kullanılarak hava boşluklarının siyaha çimento hamuru ve agregaların ise beyaza dönüştürülmesi ile elde edilmiş görüntüleri kesit fotoğraflarının hemen altında verilmiştir.



Şekil 6.8 : Sertleşmiş beton kesitleri.

Süperakışkanlaştırıcı katkının özeliği dolayısıyla oluşmuş hava kabarcıklarının daha büyük ve hatta birleşerek hapsolmuş hava boşluğuna yakın boyutta boşluklar oluşturduğu görülmüştür. Şekil 6.6'da ki görüntüler sürüklenmiş hava boşluklarının incelemesi için kaba olmasına rağmen iyi bir fikir vermiştir. Süperakışkanlatıcı katkı özeliği ve hava sürükleyici katkı ile oluşturulmuş hava boşluklarının ince kesitler üzerinde ve yüksek çözünürlüklü fotoğraf makineleri ile elde edilmiş görüntüleri yakın zamanda yapılan bazı çalışmalarda (Van den Heede ve diğ., 2013; Lazniewski-Piekarczyk, 2012) incelenmiştir.

Betonların sertleşmiş halde yapılan analizler sonucu elde edilen özgül yüzey değerlerinin hava miktarı ve aralık faktörü ile değişimleri Şekil 6.9'da verilmektedir.



Şekil 6.9 : Özgül yüzeyin hava miktarı ve aralık faktörü ile değişimi.

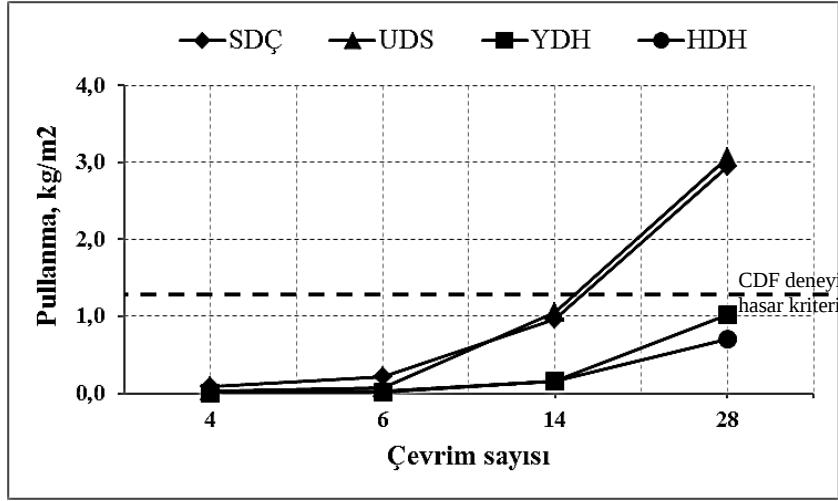
Düşük S/Ç oranına sahip ve süperakışkanlatıcı katkı kullanılan 40 kodlu karışımda özgül yüzey değeri hava sürüklenmiş karışımlarda olduğu gibi hava miktarına paralel artmamış hatta yeterli donma-çözülme dayanıklılığı için önerilen $25 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ değerinin de altında kalmıştır. Bununla birlikte karışımın özgül yüzey değeri sahip olduğu aralık faktörü değeri ile uyumlu bulunmuştur.

Süperakışkanlaştırıcı kullanımının hava boşluğu sistemi parametreleri üzerine etkisi literatür çalışması bölümünde (Bkz. 2.4.1) işlenmiş olup elde edilen sonuçlar literatürle de uyumlu bulunmuştur.

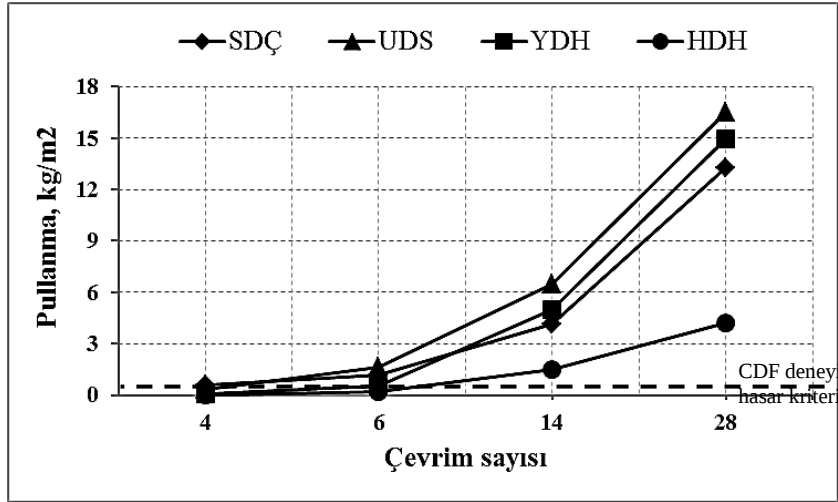
6.3.6.2 Donma-çözülme deneyleri

Pullanma:

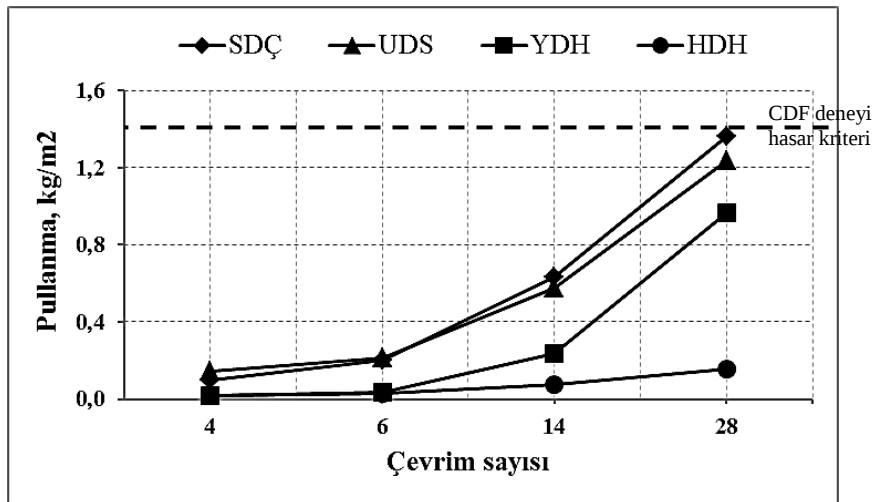
Hava sürüklenmemiş 40 ve 55 kodlu karışımlar ile hava sürüklenmiş betonları temsilen 55A1 kodlu karışıma ait çevrim sayısı pullanma grafikleri Şekil 6.10'da verilmektedir.



(a) 40 kodlu karışım



(b) 55 kodlu karışım



(c) 55A1 kodlu karışım

Şekil 6.10 : Pullanmanın çevrim sayısı ile değişimi.

Pullanma çevrim sayısı grafiklerinden hava sürüklenmiş ve hava sürüklenmemiş tüm beton karışımlarında hasarın çevrim sayısı ile arttığı görülmüştür. Donma hızının 16°C/saat olduğu hızlı donma hızı (HDH) koşulunda pullanma hasarı diğer deney koşullarındakilere kıyasla belirgin olarak daha düşük olmuştur. Literatürde yüksek donma hızının donma-çözülme hasarı üzerinde hasarı arttırıcı bir etkisinin olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Bununla birlikte bu çalışmalarda buz çözücü tuz kullanılmadığı göz önüne alınmalıdır. Sunulan bu çalışmada ise buz çözücü tuz kullanılmasıyla pullanma hasarı içsel hasara göre baskın çıkmış, dolayısıyla donma hızının yüksek olması hasarı arttırmak yerine azaltmıştır.

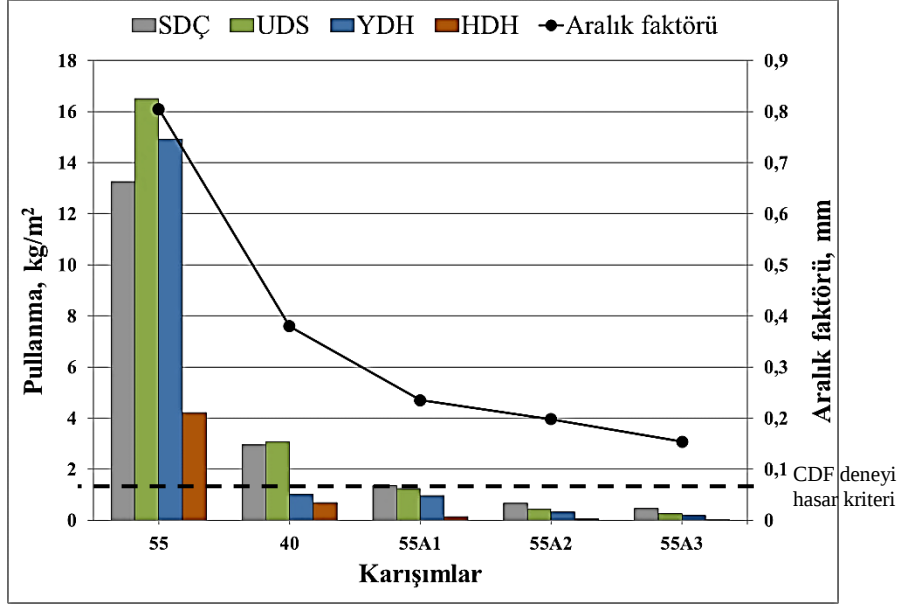
Betonların donma-çözülme çevrimleri esnasında minimum sıcaklıkta bir süre bekletildiği SDÇ ve UDS koşulları en fazla miktarda pullanmaya neden olmuşlardır. Bu sonuç, donma-çözülme etkisindeki hasarın nedeni olarak, küçük boşluklardaki henüz donmamış suyun büyük boşluklara hareketinin düşünüldüğü ozmotik basınç hipotezini destekleyici bir sonuçtur. Çünkü, sabit bir bekleme süresi boyunca su boşluklar arasında hareket etmeye imkan bulacaktır.

Düşük S/Ç oranına sahip hava sürüklenmemiş 40 kodlu karışımda SDÇ ve UDS koşulları hasar üzerinde diğer koşullara göre daha etkili olmuşlardır. Bu karışımda donma hızının değiştiği YDH ve HDH koşullarında hasar kriterinin altında pullanma miktarları elde edilmiştir.

Yüksek S/Ç oranına sahip hava sürüklenmemiş 55 kodlu karışımda tüm karışımlarda pullanma miktarı hasar kriteri değerini aşmıştır. Ayrıca bu karışımda YDH koşulu da SDÇ ve UDS koşulları gibi hasar üzerinde etkili olmuştur.

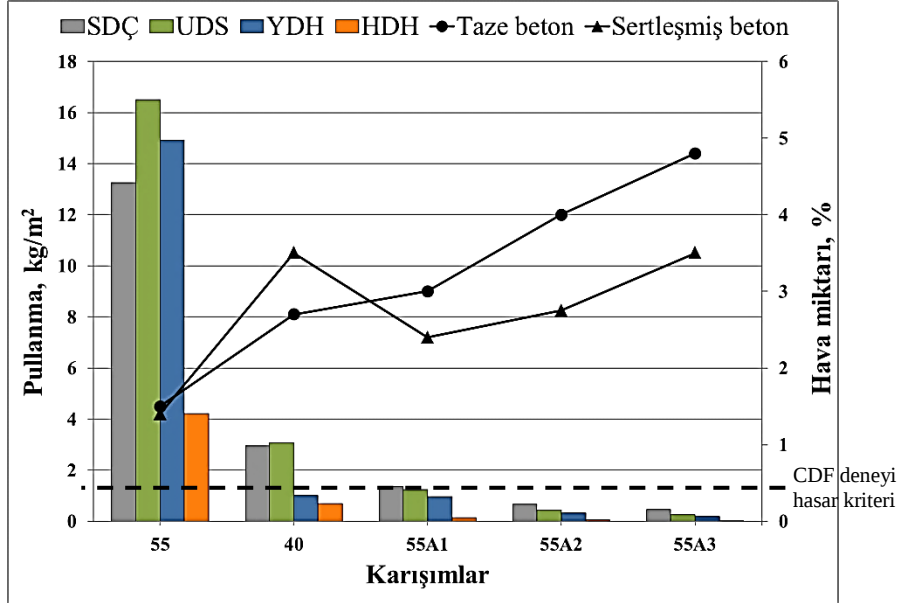
Hava sürüklenmiş betonlarda üzerinde SDÇ, UDS ve YDH deney koşulları hemen hemen aynı mertebede etkili olmuşlar bununla birlikte tüm karışımlarda en fazla hasar SDÇ koşullarında oluşmuştur.

Karışımlara ait 28 çevrim sonunda elde edilen pullanma miktarları ve aralık faktörü değerleri Şekil 6.11’de verilmektedir.



Şekil 6.11 : Karışımlara ait pullanma miktarları ve aralık faktörü değerleri.

Tüm deney koşullarında aralık faktörünün azalmasıyla pullanma hasarı azalmıştır. Donma-çözülme hasarının belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde sadece hava miktarı değerlerinin yeterli olmadığı tez çalışmasının diğer bölümlerinde yapılan deneysel çalışmalarda ortaya konmuştur. Benzer biçimde hasar üzerinde sadece hava miktarı ile yapılacak değerlendirmenin yanlış olacağı bu bölümde incelenen deney koşulları deney sonuçları ile de Şekil 6.12’de ortaya konmuştur.



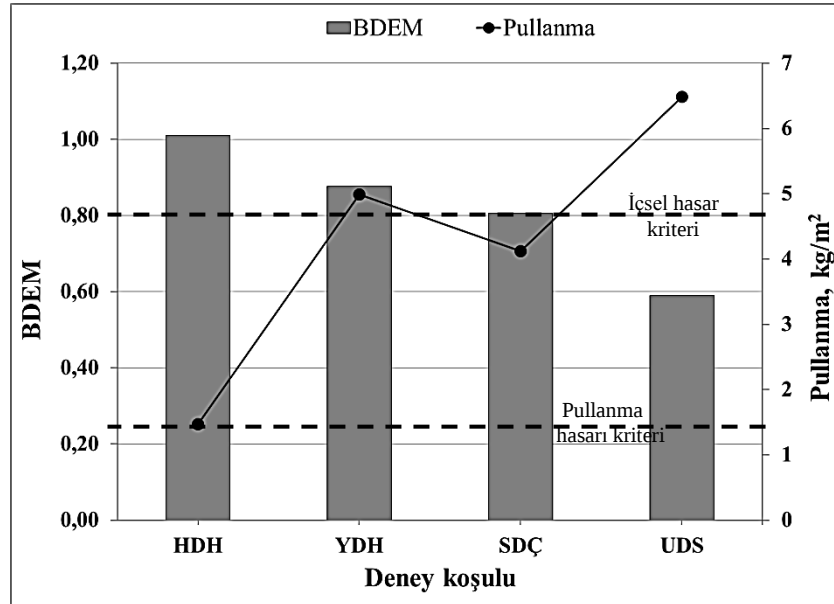
Şekil 6.12 : Pullanma hasarının hava miktarı ile değişimi.

İçsel hasar:

Hava sürüklenmiş betonlarda ve düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu betonda tüm deney koşullarında yapılan 28 donma-çözülme çevrimi sonucu içsel hasar görülmemiştir.

Hava sürüklenmemiş ve yüksek S/Ç oranına sahip 55 kodlu karışımda 4. ve 6. çevrimler sonunda yapılan ölçümlerde içsel hasar görülmezken, 28 çevrim sonunda ise pullanma neticesinde oluşan ağır hasar nedeniyle HDH koşulu hariç içsel hasar ölçümleri yapılamamıştır.

Yüksek S/Ç oranına sahip 55 kodlu karışımın farklı deney koşullarında 14 donma-çözülme çevrimi sonunda belirlenen bağıl dinamik elastisite modülü (BDEM) ve pullanma değerleri Şekil 6.13'te verilmektedir.

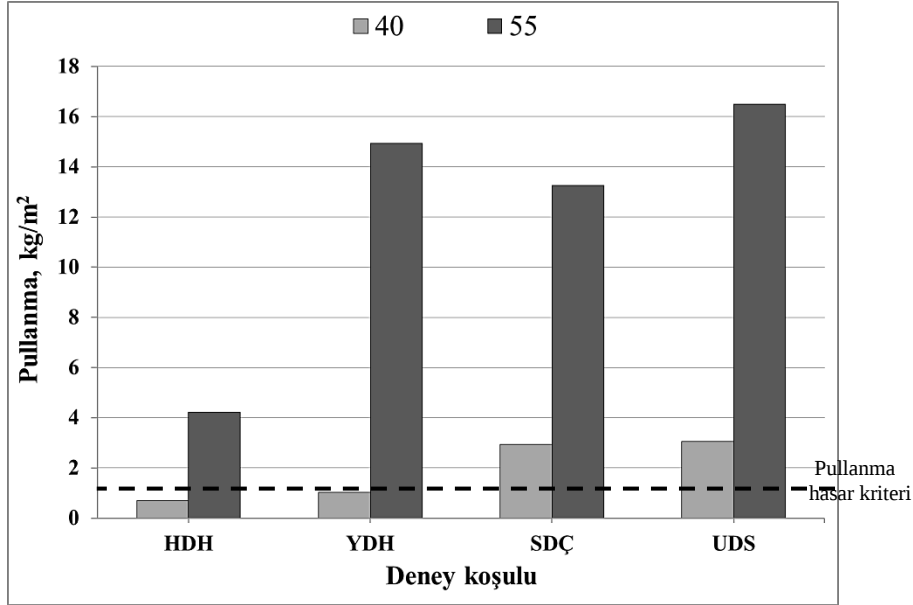


Şekil 6.13 : 55 kodlu karışıma ait 14 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen BDEM ve pullanma değerleri.

Düşük S/Ç oranına sahip 55 kodlu karışımda HDH koşulunda 14 çevrim sonunda içsel hasar oluşmamıştır. Bu deney koşulunda 28 çevrim sonunda ise BDEM 0,75 olmuştur. En ağır içsel hasar UDS koşulunda oluşmuştur. Bu betonda en ağır pullanma hasarı da yine UDS koşulunda görülmüştür. YDH ve SDÇ koşulları karşılaştırıldığında ise daha az içsel hasarın olduğu YDH koşulunda pullanma hasarı SDÇ koşuluna kıyasla daha yüksek çıkmıştır.

Pullanma ve içsel hasarın birlikte incelenmesi:

Pullanma ve içsel donma-çözülme hasarlarının karşılaştırılması hava sürüklenmemiş betonlarda yapılmıştır. İçsel hasarın oluşmadığı düşük S/Ç oranına sahip betonlarda ve içsel hasarın olduğu yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda farklı deney koşullarında elde edilen pullanma miktarları Şekil 6.14’te verilmektedir.



Şekil 6.14 : 55 kodlu karışıma ait 14 donma-çözülme çevrimi sonunda elde edilen BDEM ve pullanma değerleri.

Yavaş donma hızı yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda, uzun donma süresi ve standart donma çevrimi koşulları kadar etkili olmuşken düşük S/Ç oranına sahip betonlarda daha az etkili olmuştur. YDH koşulu, içsel hasarın olduğu betonda (55 kodlu), içsel hasarın oluşmadığı betona (40 kodlu) kıyasla pullanma hasarı üzerinde daha etkili olmuştur.

Buz çözücü tuz kullanılmasıyla pullanma hasarı baskın olmuştur ve belki belli bir pullanma miktarından sonra içsel hasar oluşumu ve gelişmesini etkileyebilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan betonlarda 4,2 kg/m² pullanma miktarından daha düşük pullanma yapmış betonlarda içsel hasar oluşmamıştır. Benzer biçimde, 4,2 kg/m²’den fazla pullanma yapmış betonlarda da içsel hasara uğramamış beton yoktur.

Elde edilen sonuçlar neden-sonuç ilişkileri ile değerlendirildiğinde bazı çıkarımlar yapılabilir; i. Eğer içsel hasar pullanma hasarı ile oluşsaydı düşük S/Ç oranına sahip

betonlarda SDÇ ve UDS koşullarında içsel hasar oluşması gerekirdi. Tersi durumda eğer pullanma hasarı içsel hasarla oluşsaydı hiç hasar oluşmazdı. ii.Eğer içsel hasar pullanma hasarı ile artsaydı Şekil 6.11’de YDH koşulunda SDÇ koşuluna kıyasla daha fazla içsel hasar oluşurdu.

Minimum sıcaklıkta bekleme süresi, donma hızı ve diğer deney koşulu özelliklerinin etkilerinin incelenmesi:

Deney koşullarına ait özelliklerin etkileri donma hızı – pullanma miktarı grafiklerinde incelenmiştir. Hava sürüklenmemiş 40 ve 55 kodlu betonlarda ve hava sürüklenmiş betonları temsilen 55A1 kodlu karışımda donma hızı pullanma miktarı ilişkileri Şekil 6.15’te verilmektedir.

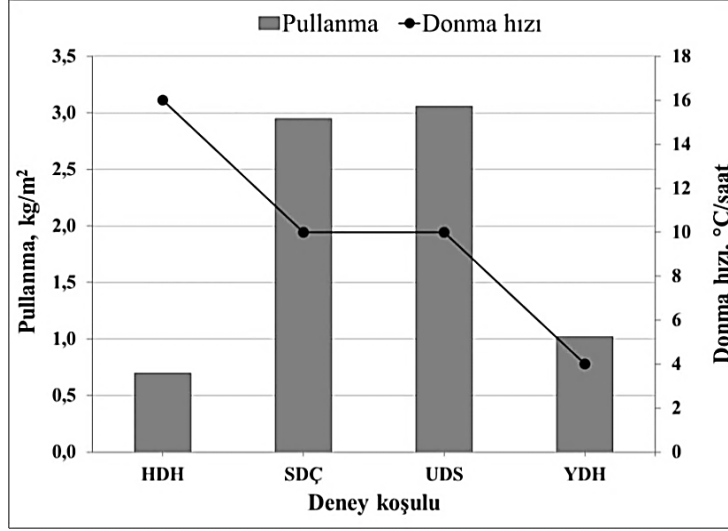
Betonların pullanma miktarları üzerinde minimum sıcaklıkta bekleme süresinin hasarı arttırıcı etkisi olup bu sürenin uzunluğunun ise belirgin bir etkisi görülmemiştir. Tüm betonlarda yavaş donma süresi hızlı donma süresine kıyasla daha fazla hasara neden olmuştur. Yavaş donma hızının etkisi düşük S/Ç oranına sahip betonlarda diğer betonlara göre daha azdır.

Sıfır derecenin altında geçen süreleri eşit olan SDÇ ve YDH koşulları yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda yakın derecede hasar oluştururken düşük S/Ç oranına sahip betonlarda minimum sıcaklıkta bekleme süresi içeren SDÇ koşulu daha fazla miktarda pullanma hasarına neden olmuştur.

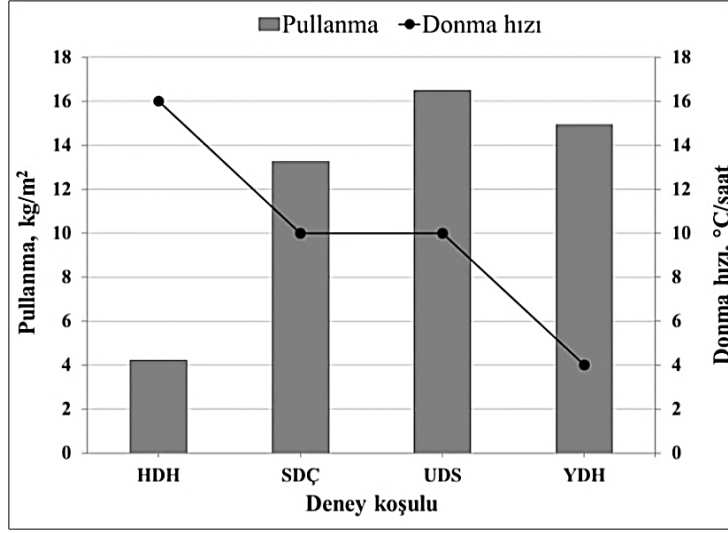
Sıfır derecenin altında geçen süresi en fazla (19 saat) olan UDS koşulu daha az süre sıfır derecenin altında kalma süresine sahip (7 saat) SDÇ koşulundan belirgin olacak şekilde farklı pullanma hasarı oluşturmamıştır. Bununla birlikte sıfır derecenin altında bekleme süresi en az (2,5 saat) olan HDH koşulu üretilen tüm betonlarda daha az pullanma hasarı oluşturmuştur.

Sıfır derecenin altında geçen süredeki etkinin dolaylı olduğu ve donma hızına ve minimum sıcaklıkta bekleme sürelerine bağlı olduğu görülmüştür.

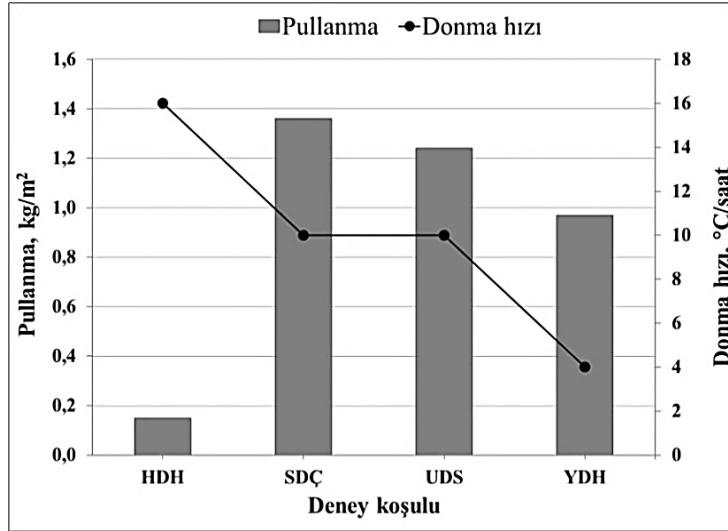
Yapılan çalışma sonunda pullanma hasarı üzerinde minimum sıcaklıkta bekleme süresinin en etkili olduğu bununla birlikte sürenin çok uzun olmasının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Donma hızının yavaş olmasının hasarı arttırdığı en şiddetli pullanma deneyinin düşük donma hızında ve minimum sıcaklıkta bekleme süresi ile oluşturulabileceği belirlenmiştir.



(a) 40 kodlu karışım.



(b) 55 kodlu karışım.

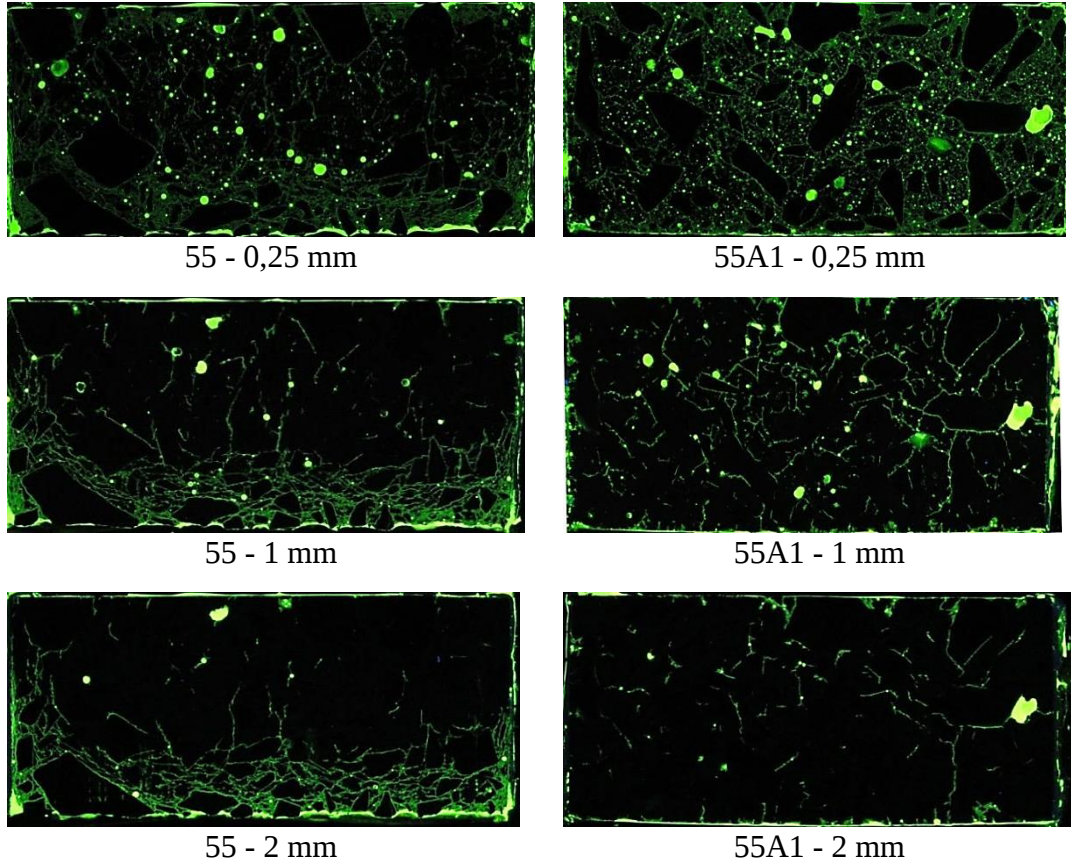


(c) 55A1 kodlu karışım.

Şekil 6.15 : Donma hızı ile pullanma miktarı ilişkisi.

6.3.6.3 Düzlem kesit incelemeleri

Düzlem kesit incelemeleri 6.2.3.2’de anlatılan yöntemle yapılmıştır. HDH koşulunda 28 donma-çözümeye çevrimine maruz kalmış hava sürüklenmemiş ve hava sürüklenmiş betonlara ait yüzeyden 0,25, 1 mm ve 2 mm aşındırma yapılarak alınmış fotoğraflar Şekil 6.16’da gösterilmektedir.



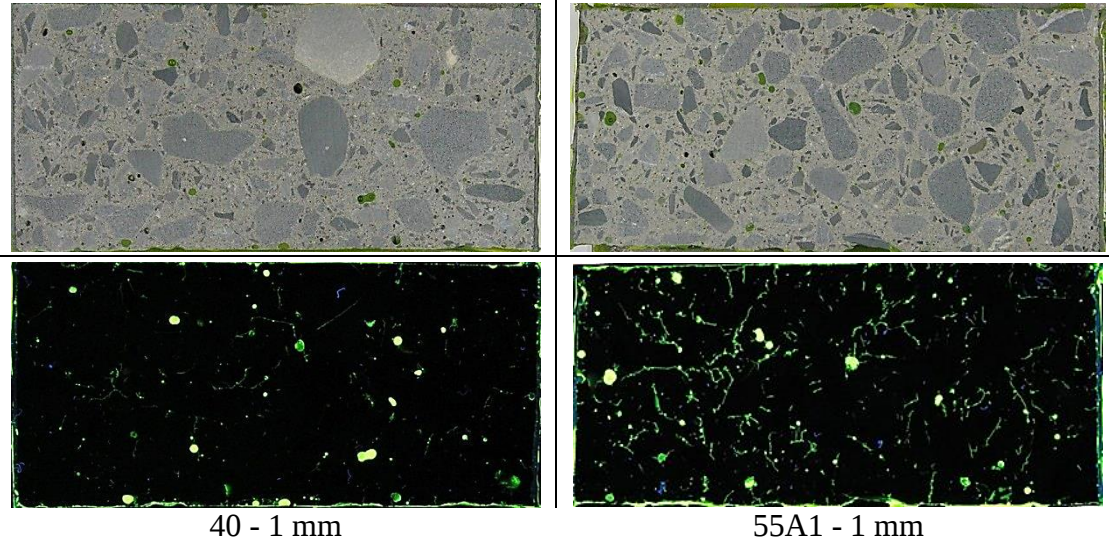
Şekil 6.16 : Farklı derinliklerde düzlem kesit görüntüleri.

Hava sürüklenmemiş 55 kodlu karışımında donma-çözülme etkisi sonucu oluşan çatlaklar görüntülenmiştir. Bu betondan 1 mm aşındırılarak alınan görüntüde hasar bölgesi açıkça elde edilmiştir. 2 mm aşındırılarak alınan görüntüde ise hasarın ağır olduğu bölgeler elde edilmiştir. Farklı derinliklerde alınan görüntüler incelendiğinde hasarın yüzeyden başlayarak yan yüzeylerden ilerlediği anlaşılmıştır.

Hava sürüklenmiş betonlarda 0,25 cm aşındırma ile yüzeyden alınan fotoğrafta hava boşluklarının dağılımı elde edilmiştir. 1 mm derinlikten alınan fotoğrafta ise büyük boyutlu hava boşlukları, hapsolmuş hava boşlukları ve agrega etrafında muhtemelen terlemeden dolayı oluşan boşluklar görüntülenmiştir. 2 mm derinlikten alınan

görüntüde ise derin hapsolmuş hava boşluğu ve bazı agregalar etrafında oluşmuş boşluklar görüntülenmiştir.

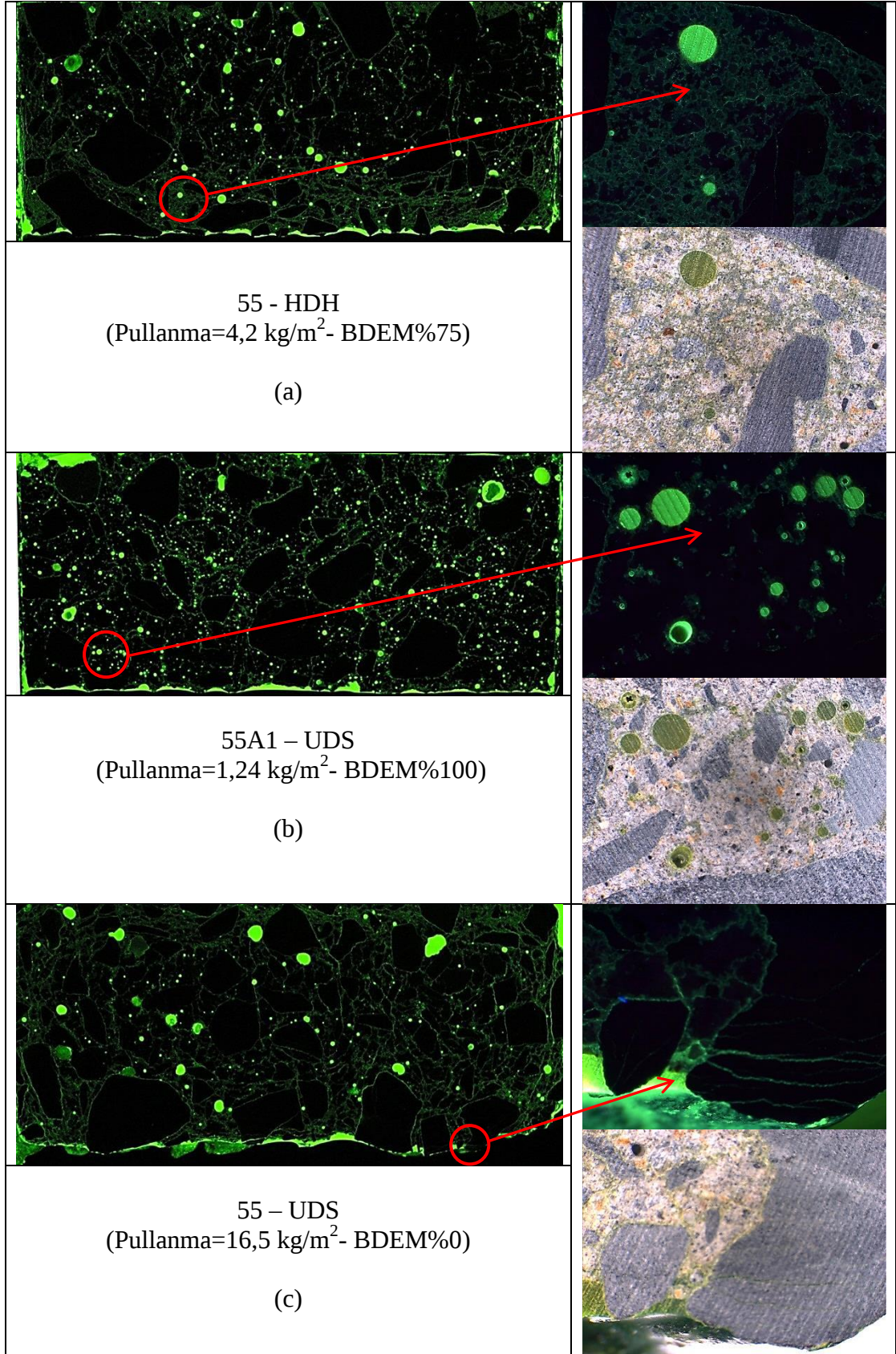
Yavaş donma hızı koşulunda 28 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış ve içsel (BDEM=100) ve pullanma hasarları (1 kg/m^2) eşit olan betonlara ait 1 mm aşındırılmış yüzeyde doğal ışık ve UV altında elde edilmiş görüntüler Şekil 6.17’de verilmektedir.



Şekil 6.17 : Eşit donma-çözülme hasarlarına uğramış farklı beton kesitleri.

Düşük S/Ç oranına sahip 40 kodlu karışımda sadece hava boşlukları görüntülenebilmiştir. Yüksek S/Ç oranına sahip 55A1 kodlu karışımda ise hava boşluklarının yanısıra muhtemelen terlemeden dolayı oluşan boşluklar da görüntülenmiştir. Doğal ışık altında elde edilen fotoğraf incelendiğinde terlemeden dolayı oluşan bu boşlukların çoğunlukla iri agregalar etrafında oluştukları gözlenmiştir.

Hava sürüklenmiş ve sürüklenmemiş ve farklı deney koşullarında deneye tabi tutulmuş bazı betonlardan elde edilen düzlem kesitlerin 0,25mm aşındırılmış yüzeyleri üzerinde optik mikroskop altında yapılan incelemeler Şekil 6.18’de verilmektedir.



Şekil 6.18 : Düzlem kesitlerin optik mikroskop altındaki incelenmeleri.

Hava sürüklenmemiş bir beton kesitinde hasar bölgesinde yaklaşık 1 cm²'lik bir alandan görüntüde (Şekil 6.16a) az sayıda hava boşluğu bulunduğu yüzeyin açık renkte olduğu buna karşın hava sürüklenmiş ve daha şiddetli bir deney koşuluna maruz kalmış bir betonda aynı büyüklükte alanda elde edilen görüntüde (Şekil 6.16b) çok sayıda hava boşluğu ve yüzeyin daha koyu renkte olduğu görülmüştür. Aynı S/Ç oranına sahip bu karışımlarda yüzeyin renginin açık olmasının nedeninin çatlaklar ve dolayısıyla hasar olabileceği düşünülmektedir.

Şiddetli pullanma hasarına uğramış bir betondan elde edilen düzlem kesitte hasarın yoğun olduğu yüzeyden alınan bir mikroskop görüntüsünde (Şekil 6.16c) pullanmanın iri agregalarda etrafındaki hamur tabakasının kaybolması sonucu kopma şeklinde değil de, doğrudan agreganın parçalanması şeklinde olduğu görülmüştür.

6.3.7 Sonuçlar

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıdaki dibi özetlenebilir.

- 1) Hava boşluğu sistemi analizleri sonucu süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile oluşan hava boşluklarının sürüklenmiş hava boşluklarından daha büyük boyutta olduğu görülmüştür.
- 2) Düşük S/Ç oranına sahip karışım, mekanik özellikleri daha üstün ve sertleşmiş beton hava miktarı hava sürüklenmiş betonlarla eşit olmasına karşın yeterli özgül yüzeye ve aralık faktörüne değerlerine sahip olmaması nedeniyle hava sürüklenmiş betonlara kıyasla daha düşük donma-çözülme performansı sergilemiştir.
- 3) Hava sürüklenmemiş betonlarda, S/Ç oranı 0,55 olan 55 kodlu karışım tüm deney koşullarında pullanma hasarına uğramış, düşük S/Ç (0,40) oranına sahip 40 kodlu karışım ise SDC ve UDS koşullarında hasar oluşurken, HDH ve YDH koşullarında pullanma değeri hasar kriterinin altında kalmıştır. Hava sürüklenmiş betonlar ise tüm deney koşullarında yeterli performans sağlamışlardır.
- 4) Hava sürüklenmiş betonlarda ve düşük S/Ç oranına sahip hava sürüklenmemiş betonda 28 çevrim sonunda içsel donma-çözülme hasarı oluşmamıştır. Hava sürüklenmemiş ve yüksek S/Ç oranına sahip betonda ise 14 çevrim sonrasında

içsel hasar oluşmaya başlamış ve 28 çevrim sonunda numuneler tamamen içsel hasara uğramıştır.

- 5) Donma-çözülme hasarlarının (içsel ve pullanma) farklı nedenlerinin olduğu ve birbirleri ile etkileşimleri farklı S/Ç oranlarındaki betonlarda farklı deney koşullarında yapılan deneylerle ortaya konmuştur. İçsel hasara uğramamış düşük S/Ç oranına sahip betonlarda pullanma hasarı oluşmuştur. SDÇ koşuluna kıyasla daha fazla pullanmanın olduğu YDH koşulunda daha az içsel hasar oluşmuştur.
- 6) Pullanma hasarı bakımında uzun donma süresi, düşük S/Ç oranına sahip betonlarda yavaş donma hızına kıyasla hasarı arttırmıştır. Yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda ise yavaş donma hızı, uzun donma süresi kadar etkili olmuştur.
- 7) Yapılan çalışma sonunda pullanma hasarı üzerinde minimum sıcaklıkta bekleme süresinin en etkili olduğu bununla birlikte sürenin çok uzun olmasının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. En düşük hasarlar ise hızlı deney koşulunda elde edilmiştir. Donma hızının yavaş olmasının hasarı arttırdığı en şiddetli pullanma deneyinin düşük donma hızında ve minimum sıcaklıkta bekleme süresi ile oluşturulabileceği belirlenmiştir.
- 8) Farklı hava sürükleyicilerin kullanıldığı ve farklı hava boşluğu sistemine sahip hava sürüklenmiş betonlar tüm deney koşullarında yeterli donma-çözülme performansı sergilemişlerdir.

7. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1) Bir hava sürükleyici katkı performansının değerlendirilmesinde yeni bir yöntem olarak yüzey gerilimi ölçümleri önerilmiştir. Yüzey gerilimi ölçümlerinin sonuçları katkıların değerlendirilmesinde yaygın olarak yapılan köpük deneyleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

a. Yüzey gerilimi ölçümleri, köpük indeksi deneyi gibi katkıların kullanım miktarlarının belirlenmesinde kullanılabilir.

Yapılan deneyler sonucunda yüzey gerilimini daha az düşüren katkılardan daha fazla kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Bunun yanında, yeterli hava boşluğu sistemi oluşturacak katkı miktarı için hava sürükleyici katkı kimyasına bağlı olarak sınır değerler elde edilmiştir.

b. Yüzey gerilimi ölçümleri, köpük drenajı deneyi gibi hava boşluklarının kararlılıklarının belirlenmesinde kullanılabilir.

Köpük drenajı deneyinde kararlılık sağlayan katkıların, yüzey gerilimini diğer katkılara kıyasla daha az düşüren katkılar olduğu görülmüştür.

c. Yüzey gerilimi ölçümleri köpük deneylerinden farklı olarak oluşacak boşlukların boyutları dolayısıyla hava boşluğu sisteminin özgül yüzeyi hakkında da fikir vermektedir.

Hava boşluğu analizleri sonucunda daha düşük özgül yüzey değerlerine sahip katkıların, yüzey gerilimini diğer katkılara kıyasla daha fazla düşüren katkılar olduğu görülmüştür.

Yüzey gerilimi ölçümleri ile elde edilen sonuçlar derlendiğinde; yüzey gerilimini fazla düşürmeyen katkılarla yeterli hava boşluğu sistemi elde edebilmek için, bu katkılardan daha fazla miktarda kullanılması gerektiği bununla beraber bu katkılarla daha büyük ve daha kararlı hava boşluklarının oluştuğu ortaya konmuştur.

- 2) Taze halde AVA cihazı ile belirlenen boşluk boyutu dağılımı histogramlarından, reçine esaslı katkıların büyük, sentetik esaslı katkıların orta büyüklükte ve yağ alkolü ve sodyum tuzu esaslı katkıların küçük boyutlu boşluklar oluşturduğu görülmüştür. Bu oluşumlar taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde de görülmüştür. Sertleşmiş betonlarda yapılan hava boşluğu sistemi analizleri sonucunda da reçine esaslı katkıların diğer hava sürükleyici katkılara kıyasla daha büyük hava boşluğu sistemi oluşturdukları belirlenmiştir.

Civalı porozimetre deneyi ile elde edilen boşluk boyut dağılımı histogramlarında ise sürüklenmiş hava boşluklarının boyut aralığında boşluk görülmemiştir. Bu nedenle, hava boşluklarının boyut dağılımlarının araştırılmasında civalı porozimetre deneyi uygulanabilir bulunmamıştır.

- 3) Hava sürükleyici katkıların betonlar üzerindeki performanslarının belirlenmesine yönelik yapılan deneylerde, çimento tipi ve uçucu kül kullanımının etkisi köpük indeksi deneyinde görülmüş, yüzey gerilimi ölçümleri ve köpük drenajı deneyinde ise belirgin olarak görülmemiştir. Ayrıca, bu deneylerde süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmadığından beton boyutunda yapılan deneylerde çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumsuzluğundan kaynaklanacak problemler belirlenememektedir.
- 4) Taze betonlar üzerinde yapılan deneylerde hava miktarının, beton kıvamından, uçucu kül kullanımından ve hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olarak zamanla arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, hava miktarlarındaki artış reçine esaslı katkıda daha az olmuştur. Hava miktarındaki artış, reçine esaslı katkının (1 nolu) kullanıldığı betonlarda % 2,5-3 iken, yağ alkolü esaslı (3 nolu) katkının kullanıldığı betonlarda % 6'ya kadar çıkmıştır. Bu artışın nedeninin kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı ile çimento uyumsuzluğundan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.
- 5) Betonlar üretildikten sonra yapılan hava miktarı ölçümlerinde kıvamın azalması yani plastik viskozite değerlerinin düşmesi ile birlikte elde edilen hava miktarları azalmıştır. Bu durumun nedeni kıvamın azalmasıyla hava boşluklarının birleşip büyük boşluk oluşturarak veya doğrudan betonu terk etmesi olabilir. Bununla birlikte, kıvamdan bağımsız olarak 60 ve 120 dakika sonunda yapılan ölçümlerde her 3 karışımda da hava miktarları yaklaşık % 3 artmıştır.

Betonların kıvamının yani viskozitesinin zamanla arttığı karışımlarda ise, hava miktarları hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olarak zamanla düşmüştür. Bu durumun nedeni, bazı hava boşluklarının daha rijit ortam içinde zamanla yok olması olabilir.

- 6) Betonlar üzerinde yapılan deneylerde, uçucu kül kullanımının katkı miktarını hava sürükleyici katkının kimyasal esasından bağımsız olarak arttırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte uçucu kül kullanımının boşlukların kararlılıkları üzerinde olumsuz etkisi görülmemiştir.
- 7) Yetersiz hava boşluğu sistemine sahip olup donma-çözölmeye karşı dayanıklı veya yeterli hava boşluğu sistemine sahip olup donma-çözölmeye karşı dayanıksız bir beton karışımı olmamıştır. Bu sonuçla donma-çözölmeye dayanıklılığı açısından, hava sürükleyici katkı kimyası da dahil olmak üzere en önemli etkenin hava boşluğu sistemi olduğu ortaya konmuştur.

Elde edilen bu sonuçla, literatürde yer alan bazı çalışmalardaki hava sürükleyici katkıların hava miktarlarının yüksek olmasına karşın yeterli donma-çözölmeye dayanıklılığı sergilememiş olmasının nedeni o çalışmalarda hava boşluğu sistemi analizlerinin yapılmamış olması ve değerlendirmenin sadece hava miktarına göre yapılmış olması düşünülebilir. Sadece hava miktarına göre yapılacak değerlendirmenin yanıltıcı olabileceği, çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları ile belirlenmiş ve nedenleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- a. Sertleşmiş betonda yapılan hava boşluğu sistemi analizlerinde kesite giren hapsedilmiş hava boşluğu, hava miktarının olduğundan fazla hesaplanmasına neden olurken, aralık faktörü ve özgül yüzey hesaplarına etki etmemektedir.
- b. Taze betonlarda elde edilen hava miktarı sertleşmiş betonlardan hesaplananlardan daha yüksek çıkmaktadır. Bu durumun nedeni, numune alınırken yapılan yerleştirme işlemleri sayesinde hapsedilmiş hava boşlukları oluşmamasıdır.
- c. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılan betonlarda da taze betonun hava miktarı daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, süperakışkanlaştırıcı katkı özeliği nedeniyle oluşan büyük boyutlu hava boşluklarıdır. Bu büyük hava boşlukları hava miktarının olduğundan fazla hesaplanmasına neden olurken, aralık faktörü ve özgül yüzey değerlerine kayda değer bir etki yapmamaktadır.

- 8) Katkıların kimyasal esaslarının mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte, katkıların kimyasal esasları dolayısıyla oluşturdukları hava boşluğu sistemi parametreleri ultrases geçiş hızı ve elektriksel iletkenlik üzerinde etkili olurken, kılcal su geçirimsizliği ve klorür geçirimsizliği üzerinde etkili olmamıştır.
- 9) Deney koşullarının donma-çözülme hasarları üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.
- a. Farklı hava sürükleyici katkıların kullanıldığı hava sürüklenmiş betonlar tüm deney koşulları altında yeterli donma-çözülme dayanıklılığı göstermiştir.
 - b. Betonların minimum sıcaklıkta bekletilmesinin pullanma hasarının artmasında en etkili deney koşulu olduğu, bununla birlikte sürenin çok uzun olmasının belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Şiddetli bir pullanma deneyinin yavaş donma hızında ve minimum sıcaklıkta bekleme süresi ile oluşturulabileceği görülmüştür.
 - c. Donma-çözülme deneylerinde buz çözücü tuz kullanılmasıyla pullanma hasarı, içsel hasara göre baskın çıkmış ve yavaş donma hızı hasarı arttırmıştır. Literatürde yer alan buz çözücü tuz kullanılmayan çalışmalarda ise içsel hasar baskın olmuş ve hızlı donma hızı hasarı arttırmıştır. Donma hızının hasarlar üzerinde farklı etkisi sonucu bu hasarların oluşma nedenlerinin birbirlerinden farklı olduğu anlaşılmıştır.
 - d. Yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda pullanma hasarının şiddetlenmesiyle içsel hasar oluşmuştur. Düşük S/Ç oranına sahip betonlarda ise pullanma hasarı oluşmasına rağmen içsel hasar görülmemiştir.

İleri çalışmalar ve öneriler:

- 1) Köpük indeksi yöntemi yaygın olarak kullanılmasına karşın değerlendirmenin görsel olması ve operatöre bağlı olması nedeniyle hala standartlaşmamıştır. Yüzey gerilimi yönteminin ise standartlaşması için daha fazla araştırmaya ve ileri çalışmalara gereksinim vardır.
- 2) Hava sürükleyici katkıların beton performanslarının belirlendiği ön deneylerde, beton bileşenlerinin uyumsuzluğundan veya beton tasarımından kaynaklı bazı beklenmeyen sonuçlar görülebilmektedir. Bu nedenle, ön deneylerde

süperakışkanlaştırıcı katkının kullanılması ve böylece çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunun da dikkate alınması gerektiği anlaşılmıştır.

- 3) Yavaş donma hızı, yüksek S/Ç oranına sahip betonlarda hasar üzerinde diğer koşullar kadar etkili olurken, düşük S/Ç oranına sahip betonlarda daha az etkili olmuştur. Bu sonuçla, deney koşullarının hasar üzerindeki etkilerinin beton özelliklerine bağlı olarak değişebildiği söylenebilir. Buz çözücü tuz kullanımının hasarın türünü değiştirdiği ve bunun ozmotik basınç hipotezini doğruladığı bilinmektedir. Benzer biçimde farklı S/Ç oranına sahip betonlarda yapılacak farklı deney koşullarının uygulandığı deneylerden elde edilecek sonuçların, donma-çözülme olayının mekanizmasını aydınlatacağı dolayısıyla hipotezlere destek veya yeni hipotezlerin oluşmasını sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada ise hava sürükleyici katkı kimyasına ve hava boşluğu sisteminin yeterliliğine odaklanılmıştır. Dolayısıyla, incelenen S/Ç oranı kısıtlıdır ve hava boşluğu sistemleri de farklıdır.

KAYNAKLAR

- Aitcin, P.C., Ballivy, G., Mitchell, D., Pigeon, M., ve Coulombe, L.G.** (1993). The use of a high-performance air-entrained concrete for the construction of the Portneuf Bridge. In P. Zia (Ed.), *High Performance Concrete in Severe Environments*, ACI Special Publication (SP-140, pp. 53-72). Detroit, MI, USA.
- Aligazaki, K.K., ve Cady, P.D.** (1999). Air content and size distribution of air voids in hardened cement pastes using the thin section-analysis method, *Cement and Concrete Research*, 29 (2), 273-280.
- Ansari, F., Zhang, Z., Maher, A., ve Szary, P.** (2002). *Effects of synthetic air entraining agents on compressive strength of portland cement concrete-mechanism of interaction and remediation strategy* (Report no. FHWA-NJ-2002-025), U.S. : Federal Highway Administration. Retrieved from <http://cait.rutgers.edu/files/FHWA-NJ-2002-025.pdf>
- Atahan, H.N., Carlos, Jr.C., Chae, S., Monteiro, P.J.M., ve Bastacky, J.** (2008). The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants, *Cement and Concrete Composites*, 30 (7), 566-575.
- Backstrom, J.E., Burrows, R.W., Mielenz, R.E., ve Wolkodoff, V.E.** (1958). Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part 3: Influence of water-cement ratio and compaction, *Journal of the American Concrete Institute*, 55, 359-375.
- Barfield, M., ve Ghafoori, N.** (2012). Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources, *Construction and Building Materials*, 26 (1), 490-496.
- Camposagrado, G.R.** (2006). *An investigation on the cause and effect of air-void coalescence in air-entrained concrete mixes* (R&D Serial no. 2624). U.S. : Portland Cement Association.
- Chatterji, S.** (2003). Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents, *Cement and Concrete Composites*, 25 (7), 759-765.
- Comite Euro-International du Beton**, (1989). Durable concrete structures_CEB : design guide, *Comite Euro-International du Beton*, Bulletin No.182, Lausanne, Switzerland.
- Corr, D.J., Lebourgeois, J., Monteiro, P.J.M., Bastacky, S.J. ve Gartner, E.M.** (2002). Air void morphology in fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1025-1031.
- Cross, W., Duke, E., Kellar, J., ve Johnston, D.** (2000). *Investigation of low compressive strengths of concrete paving, precast and structural concrete* (Report no. SD98-03-F). U.S. : Federal Highway

Administration - South Dakota Department of Transportation.
Retrieved from http://www.sddot.com/business/research/projects/docs/SD1998_03_FINAL_report.pdf

- Diamond, S.** (2000). Review mercury porosimetry - An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 30 (10), 1517-1525.
- Dodson, V.** (1980). Foam index test. *Presentation at the Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA.
- Dodson, V.** (1990). *Concrete admixtures*. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Du, L., ve Folliard, K.J.** (2005). Mechanisms of air entrainment in concrete, *Cement and Concrete Research*, 35 (8), 1463-1471.
- Edmeades, R. M., ve Hewlett, P. C.** (1986). Admixtures-present and future trends. *Concrete*, 20 (8), 4-7.
- Fagerlund, G.** (1995). *Freeze-thaw resistance of concrete concrete* (Report no. TVBM-3060). Sweden : Lund Institute of Technology. Retrieved from <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1291977&fileId=1762611>
- Farkas, F.** (1964). The role of alkali in air entrainment, *Rock Products Chemical Research Seminar*, Illinois, USA.
- Friberg, S.** (1976). Emulsion stability. In: Friberg S (Ed.), *Food emulsions* (pp. 1-38), New York: Marcel Dekker.
- Gebler, S.H., ve Klieger, P.** (1983). *Effect of fly ash on the air-void stability of concrete* (R&D Serial no. 085). U.S. : Portland Cement Association.
- Gutmann, P.F.** (1988). Bubble characteristics as they pertain to compressive strength and freeze-thaw durability, In: Bonding in Cementitious Composites. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Pittsburgh, PA.
- Jacobsen, S., Saether, D.H., ve Sellevold, E.J.** (1997). Frost testing of high strength concrete: frost/salt scaling at different cooling rates. *Materials and Structures*, 30 (1), 33-42.
- Khayat, K.H., ve Assaad, J.** (2002). Air-void stability in self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 99 (4), 408-416.
- Kligys, M., Laukaitis, A., Sinica, M., ve Sezemanas, G.** (2007). The influence of some surfactants on prous concrete properties, *Materials Science*, 13 (4), 310-316.
- Koehler, E.P., ve Fowler, D.W.** (2004). *Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete* (Report no. 105-3F), U.S. : The University of Texas at Austin - International Center for Aggregates Research. Retrieved from <http://www.icar.utexas.edu/publications/105/105-3F.pdf>
- Kozikowski, R.L., Vollmer, D.B., Taylor, P.C. ve Gebler, S.H.** (2005). *Factors affecting the origin of air-void clustering* (R&D Serial no. 2789). U.S. : Portland Cement Association.

- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., ve Panarese, W. C.** (2002). *Design and control of concrete mixtures* (14th ed.). Stokie, Illinois : Portland Cement Association.
- Krejier, C.I.** (1967). Effect of admixtures on the frost resistance of early age concrete, In RILEM-ABEM International Symposium. *Admixtures for Mortar and Concrete*, (pp. 235-244), Brussels, Belgium.
- Lazniewska-Piekarczyk, B.** (2012). The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 31, 310–319.
- Lazniewska-Piekarczyk, B.** (2013). The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 659–671.
- Litvan, G. G.** (1983). Air entrainment in the presence of superplasticizers. *ACI Journal*, 80 (33), 326-331.
- Magura, D.D.** (1996). *Air void analyzer evaluation* (Report no. FHWA-SA-96-062). U.S. : Federal Highway Administration. Retrieved from <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013379.pdf>
- Mielenz, R. C., Wolkodoff, V. E., Backstrom, J. E., ve Flack, H. L.** (1958). Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete. Part I- Entrained air in unhardened concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, 55, 95-121.
- Mielenz, R. C.** (1968). Use of surface active agents in concrete, *Fifth International Conference on Chemistry of Cement*, (Vol. IV-1, pp. 1-35), Tokyo, Japan.
- Myers, D.** (2006). *Surfactant Science and Thecnology* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Nagi, M. A., Okamoto, P. A., Kozikowski, R. L., ve Hover, K.** (2007). *Evaluating air-entraining admixtures for highway concrete* (NCHRP Report no. 578). U.S. : National Cooperative Highway Research Program. Retrieved from http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_578.pdf
- Pedersen, K.H., Andersen, S.I., Jensen, A.D. ve Dam-Johansen, K.** (2007). Replacement of the foam index test with surface tension measurements, *Cement and concrete research*, 37 (6), 996-1004.
- Petersen, C.G.** (2009). Air void analyzer for fresh concrete, latest advances, *Ninth ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Sevilla, Spain : October 13-17.
- Pigeon, M., Prevost, J., ve Simard, J.M.** (1985). Freeze thaw durability versus freezing rate, *ACI Journal*, 82, 684-692.
- Pigeon, M., ve Pleau, R.** (2006). *Durability of concrete in cold climates*. London : Taylor & Francis.

- Pleau, R., Pigeon, M., Faure, R. M., ve Sedran, T.** (1990). Micro air voids in concrete: a study of the influence of superplasticizers by means of optical microscopy and scanning electron microscopy, *Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete*, ACI Special Publication (SP-122, pp. 105-124), USA.
- Powers, T.C.** (1945). A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, 16 (4), 245-272.
- Powers, T.C., ve Brownyard, T.L.** (1948). Studies of the physical properties of hardened portland cement paste, *Portland Cement Association* (Bulletin 22), Chicago, IL.
- Powers, T.C., ve Willis, T.F.** (1949). The air requirement of frost resistant concrete, *Proceedings of the Highway Research Board*, 29, 184-211.
- Powers, T.C., ve Helmuth, R.A.** (1953). Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing, *Proceedings of the Highway Research Board*, 32, 285-297.
- Regourd, M.** (1982). Microstructures et propriétés des ciments, mortiers et betons, *Ciments, Betons, Pl  tres, Chauxs*, 734, 41-47.
- Saucier, F., Pigeon, M., ve Cameron, G.** (1990). Air void stability, Part III - field tests of superplasticized concretes. *ACI Materials Journal*, 87 (1), 3-11.
- Scherer, G.W., Chen, J., ve Valenza, J.** (2003). *U.S. Patent no. 2003/0110984 A1*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Scherer, G.W., ve Valenza, J.** (2004). Mechanism of frost damage. In *Material Science of Concrete VII* (pp. 209-246), New York, NY.: Wiley.
- Setzer, M.J.** (2006). Correct simulation of real frost attack in laboratory tests. In K. Kovler (Ed.), *ConcreteLife'06 - International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments* (pp. 167-176). RILEM Publications SARL.
- Simon, M. J., Jenkins, R. B., ve Hover, K. C.** (1992). The influence of immersion vibration on the void system of air entrained concrete, durability of concrete, *G. M. Idorn International Symposium*, ACI Special Publication (SP-131, pp. 99-126), USA.
- Stencel, J.M., Song, H., ve Cangialosi, F.** (2009). Automated foam index test: Quantifying air entraining agent addition and interactions with fly ash-cement admixtures, *Cement and Concrete Research*, 39 (4), 362-370.
-   ahin, R.** (2003). *Normal Portland tipi çimentolu betonların don direncinin taguchi yöntemi ile optimizasyonu ve hasar analizi* (Doktora tezi), Atat  rk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
-   eng  l,   .** (2012). Factors affecting the electrical resistivity of concrete. *Proceedings of Nondestructive Testing of Materials and Structures-2011*, RILEM Book Series (Vol 6 . pp. 236-369). Turkey : Istanbul Technical University, May 15-18.

- Tanesi, J., ve Meininger, R.** (2006). *Freeze-thaw resistance of concrete with marginal air content* (Report no. HRT-06-117). U.S. : Federal Highway Administration. Retrieved from <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/06117/06117.pdf>
- Taylor, H.F.W.** (1992). *Cement chemistry*. San Diego : Academic Press.
- Taylor, P.C., Graf, L.A., Zemajtis, J.Z., Johansen, V.C., Kozikowski, R.L. ve Ferraris, C.F.** (2006). *Identifying incompatible combinations of concrete materials: volume II-test protocol* (Report no. HRT-06-080). U.S. : Federal Highway Administration. Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/concrete/06080/06080.pdf>
- Van den Heede, P., Furniere, J., ve De Belle, N.** (2013). Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete, *Cement and Concrete Composites*, 37, 293–303.
- Whiting, D., ve Stark, D.** (1983). *Control of air content in concrete* (Report no. 258). U.S. : National Cooperative Highway Research Program.
- Whiting, D.A., Todres, A., Nagi, M., Yu, T., Peshkin, D., Darter, M., Geiker, M.** (1993). *Synthesis of current and projected concrete highway technology* (Report no. SHRPC-C-345). U.S. : National Research Council. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-C-345.pdf>
- Whiting, D.A., ve Nagi, M.A.** (1998). *Manual on control of air content in concrete*, Portland Cement Association (PCA EB116), Skokie, Illinois, USA.

EKLER

EK A: Hava boşluğu sistemi parametrelerinin hesabı

EK B: Hava sürükleyici katkıların FTIR analizleri

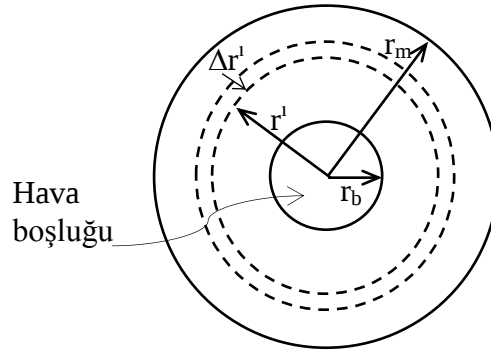
EK C: Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları

EK D: Köpük drenajı deney sonuçları

EK A : Hava boşluğu sistemi parametrelerinin hesabı

Bu bölüm T. C. Powers'ın (Powers, 1949) "The air requirement of frost resistance concrete" adlı çalışmasından hazırlanmış olup, hidrolik basınç hipotezine göre betonlarda donma-çözülme dayanıklılığı için gerekli hava boşluğu sistemi parametreleri araştırılmıştır.

Hava boşluğu çevreleyen hamur tabakası, kalınlıkları Δr olan küresel kabuklardan oluşmaktadır (Şekil A.1).



Şekil A.1 : Bir hava boşluğu ve onu çevreleyen çimento hamuru tabakası.

$r = r^l + \Delta r^l$ olmak üzere kabuk elemanların herhangi bir tanesinin hacmi:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3}\pi r^3 - \frac{4}{3}\pi (r^l)^3 &= \frac{4\pi}{3}(r^3 - (r^l)^3) = \frac{4\pi}{3}[(r - r^l)(r^2 + rr^l + (r^l)^2)] = \\ \frac{4\pi}{3}\Delta r^l((r^l)^2 + 2r^l\Delta r^l + (\Delta r^l)^2 + rr^l + (r^l)^2) &= \frac{4\pi}{3}\Delta r^l(2(r^l)^2 + 2r^l\Delta r^l + \\ (\Delta r^l)^2 + (r^l)^2 + \cancel{r^l\Delta r^l}) &= \frac{4\pi}{3}\Delta r^l(3(r^l)^2 + 3r^l\Delta r^l + (\Delta r^l)^2) = 4\pi(r^l)^2\Delta r^l \text{ dir.} \end{aligned}$$

Donma esnasında elemandan atılan su miktarı:

$$\Delta V = (1,09 - 1/s)\Delta w_f 4\pi(r^l)^2\Delta r^l$$

Burada, s, doygunluk katsayısı ($s=1 \Rightarrow 1,09-1=0,09=1$ g suyun normal genişmesi), Δw_f ise donmuş sudaki artış olup birimi g/cc'dir.

Donan su miktarı sıcaklığın fonksiyonu olduğundan, elemandan atılan su miktarı:

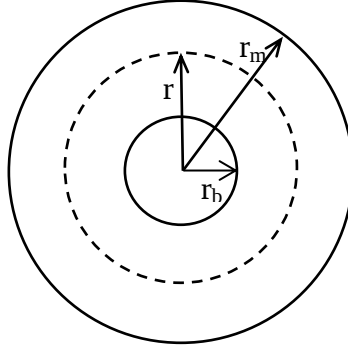
$$\frac{dV}{dQ} = \left(1,09 - \frac{1}{s}\right) \frac{dw_f}{dQ} 4\pi(r^l)^2\Delta r^l \quad (\text{A 1.1})$$

Burada, Q=sıcaklık x (-1)°C'dir.

$$\text{Elemandan dışarı akış hızı: } \frac{dV}{dt} = \left(1,09 - \frac{1}{s}\right) \frac{dw_f}{dQ} \frac{dQ}{dt} 4\pi(r^t)^2 \Delta r^t \quad (\text{A 1.2})$$

Burada, t, saniye biriminden zaman ve $\frac{dQ}{dt}$ ise soğuma hızıdır.

Hava boşluğu merkezinden r kadar uzakta bulunan bir boşluktan atılan su, etkili alan (r_m) boyunca yol almaktadır (Şekil A.2).



Şekil A.2 : Bir hava boşluğu ve onu çevreleyen çimento hamuru tabakası.

$$\frac{dV}{dt} = \left(1,09 - \frac{1}{s}\right) \frac{dw_f}{dQ} \frac{dQ}{dt} 4\pi \int_r^{r_m} (r^t)^2 dr^t \quad (\text{A 1.3})$$

Denklem A 1.3'ün integrali alınıp akışın meydana geldiği alana ($a=4\pi r^2$) bölünmesiyle aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\frac{dV}{dt} \frac{1}{a} = C \left(\frac{r_m^3}{r^2} - r \right) \quad (\text{A 1.4})$$

$$\text{Burada,} \quad C = \frac{1}{3} \left(1,09 - \frac{1}{s}\right) \frac{dw_f}{dQ} \frac{dQ}{dt}, \text{dir.} \quad (\text{A 1.5})$$

Hamur boyunca oluşan su hareketine gösterilen direnç, hidrolik basınç gradyanını arttırmalıdır. Darcy kanununa göre: $\frac{dP}{dr} = \frac{\eta}{K} \frac{dV}{dt} \frac{1}{a}$ (A 1.6)

Burada, P =hidrolik basınç (dyn/cm^2), η = suyun viskozite katsayısı ve K =hamurun geçirimsizlik katsayısıdır. Denklem A 1.4 ve denklem A 1.6'nın birleştirilmesiyle aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\eta}{K} C \left(\frac{r_m^3}{r^2} - r \right) \quad (\text{A 1.7})$$

Denklem A 1.7'nin kalınlık boyunca integrali alınmasıyla aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\eta}{K} C \int_{r_b}^r \left(\frac{r_m^3}{r^2} - r \right) dr = \frac{\eta}{K} C \left[\frac{r_m^3}{r_b} + \frac{r_b^2}{2} - \frac{r_m^3}{r} - \frac{r^2}{2} \right] \quad (\text{A 1.8})$$

Denklem A 1.8 etkili alan içindeki herhangi bir noktadaki hidrolik basıncın genel denklemidir. Basıncı, $r=r_m$ noktasında maksimum olur.

$$P_{maks} = \frac{\eta}{K} C \left[\frac{r_m^3}{r_b} + \frac{r_b^2}{2} - r_m^2 - \frac{r_m^2}{2} \right] \quad (\text{A 1.9})$$

Hava boşluğu çeperinden etkili alan sınırına olan mesafe L olarak tanımlanırsa:

$$L = r_m - r_b \quad (\text{A 1.10})$$

Denklem (A 1.10) kullanılarak denklem (A 1.9) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{maks} = \frac{\eta}{K} C \phi(L) \quad (\text{A 1.11})$$

Burada;

$$\phi(L) = \frac{L^3}{r_b} + \frac{3L^2}{2}, \text{dir.}$$

Eğer çimento hamuru suya doygunsa ($s=1$), denklem A 1.5 şu şekilde düzenlenebilir;

$$C = 0,03 \frac{dw_f dQ}{dQ dt}$$

Bu değer denklem (A 1.11)'de yazılırsa;

$$P_{maks} = \frac{0,03\eta}{K} \frac{dw_f}{dQ} \frac{dQ}{dt} \phi(L) \quad (\text{A 1.12})$$

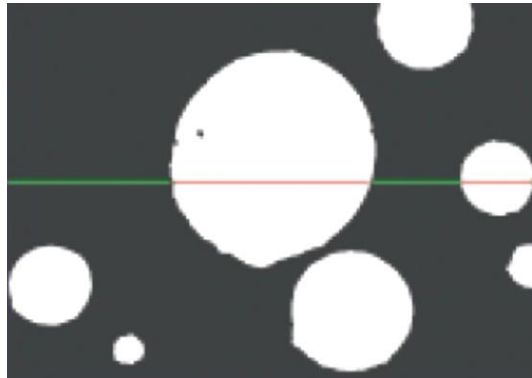
$R = \frac{dQ}{dt}$ ve $u = \frac{dw_f}{dQ}$ olmak üzere doygun hamur için:

$$P_{maks} = 0,03\eta \frac{UR}{K} \phi(L) \text{ olur.} \quad (\text{A 1.13})$$

Bu formüller kullanılarak maksimum P basıncı için aralık faktörü (L) hesaplanabilir.

Doğrusal ölçümlerle hava boşluğu sistemi parametrelerinin hesaplanması:

Bu bölümde anlatılan hesaplamalar ASTM C 457 (Procedure A: Linear traverse method) standardı ve TS EN 480-11 standartlarında kullanılmaktadır.



Şekil A.3 : Bir doğrusal ölçüm kesiti örneği.

A: Toplam hava miktarı, n: çizginin birim uzunluğu boyunca geçilen boşluk sayısı ve l: hava boşluklarından geçen ortalama çizgi uzunluğu olmak üzere;

$$A=nl' \text{ dir.} \quad (\text{A 1.14})$$

Hava boşluklarının özgül yüzeyi: Hava boşluklarının toplam yüzeyinin, hacmine bölünmesiyle bulunan ve mm^{-1} (mm^2/mm^3) birimi ile gösterilen bir parametredir. Kullanılan hesaplama metodu, ortalama giriş uzunluğuna dayanır ve herhangi bir küresel boşluk sistemi için geçerlidir. Boşluk boyut dağılımından bağımsız olarak denklem A 1.15'e göre hesaplanmaktadır.

$$\alpha = \frac{4}{l} \quad (\text{A 1.15})$$

Denklem A 1.14'te ki l değeri denklem A 1.15'te yerine konulursa;

$$\alpha = \frac{4n}{A} \quad (\text{A 1.16})$$

Aralık faktörü: Çimento hamuru içindeki herhangi bir nokta ile hava boşluğunun dış sınırı arasında kalan ve boşluksuz çimento hamurunda ölçülen en büyük mesafe kullanılarak hesaplanan, mm birimi ile gösterilen bir parametredir. Bu parametrenin hesaplanmasında, mevcut bütün hava boşluk çaplarının aynı olduğu ve model sistemin, gerçek sistemle aynı toplam hacme ve yüzeye sahip olacak şekilde çimento hamuru içinde eşit olarak dağıldığı varsayılır.

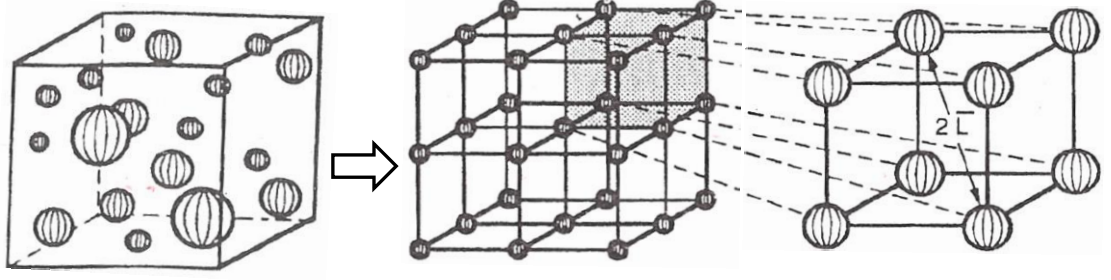
p: çimento hamuru miktarı olmak üzere, hava boşluğu çevresindeki çimento hamuru kalınlığı olan aralık faktörü aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{p}{\alpha A} = \frac{p}{4n} \quad (\text{A 1.17})$$

Denklem A 1.17'de yapılan kabuller dolayısıyla, boşluk çapının artması sonucu çimento hamuru tabakasının kalınlığı gerçek değerinden farklı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada küresel boşluklar arasındaki hamurla kaplı alanın gerçek durumundaki hali dikkate alınmamaktadır. Tüm boşlukların küresel ve eşit çaplı dolayısıyla eşit özgül yüzeye sahip olduğu durumda aralık faktörü aşağıda gibi hesaplanabilir.

$$\text{Kürelerden herhangi birinin yarıçapı, } \alpha = \frac{4\pi r_h^2}{\frac{4}{3}\pi r_h^3}, r_h = \frac{3}{\alpha} = \frac{3}{4} \text{ olacaktır.} \quad (\text{A 1.18})$$

Bu kürelerin her birinin bir küpün içinde olduğu ve bu küplerin toplam hacimlerinin toplam hava miktarı ve hamur hacmine eşit olduğu kabul edilir.



Şekil A.4 : Hava boşluk sisteminin modellenmesi (Pigeon ve Pleau, 2006).

Varsayılan küpün hacmi, $\frac{p+A}{N}$ 'dir. Küpün bir kenar uzunluğu ise $\left(\frac{p+A}{N}\right)^{\frac{1}{3}}$ 'dir.

Burada, p, çimento hamuru içeriği, N, yarıçapı r_h olan boşluk sayısı (gerçek hava hacmine eşittir, gerçek kabarcık sayısı değildir.).

Şekil A.1'de gösterilen etkili alan yarıçapı r_m yapılan kabuller sonucunda aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$r_m = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{p+A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{A 1.19})$$

Aralık faktörü, $L = r_m - r_h$ buradan,

$$L = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{p+A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} - r_h \quad (\text{A 1.20})$$

$$\text{Yarıçapı } r_h \text{ olan boşluk sayısı, } N = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi r_h^3} = \frac{\alpha^3 A}{36\pi} \quad (\text{A 1.21})$$

Denklem A 1.21'de elde edilen N değerinin denklem A 1.20'de yerine yazılmasıyla;

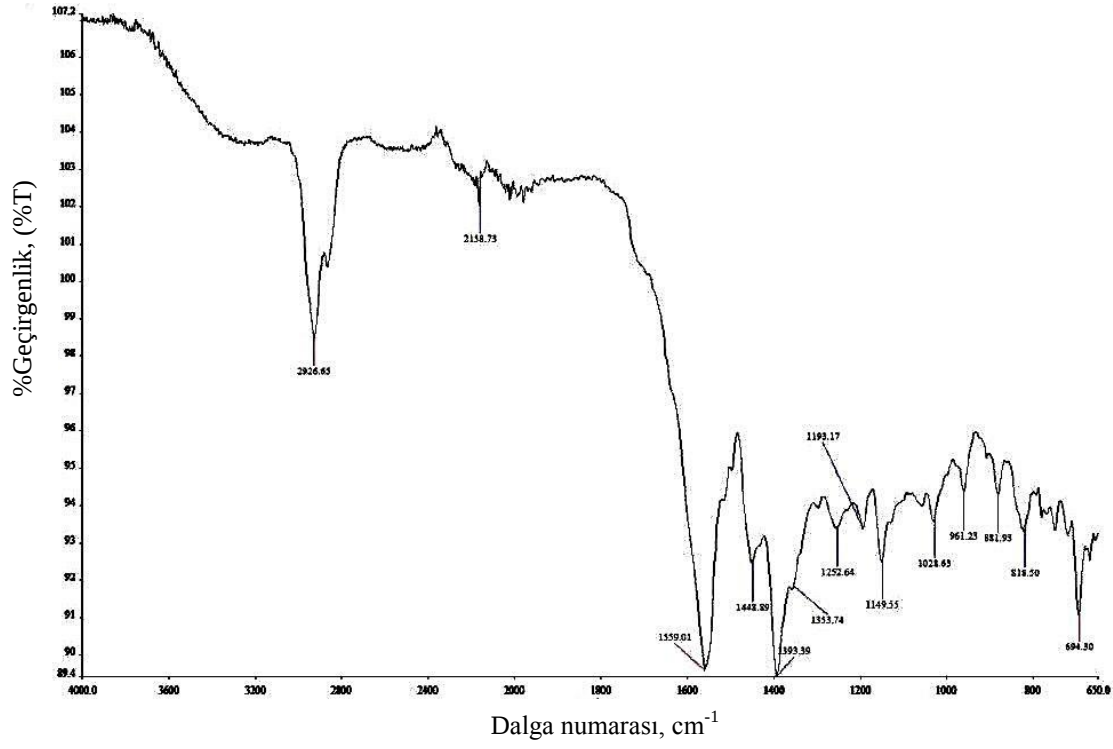
$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1,4 \left(\left(\frac{p+A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \right) - 1 \right] \text{ elde edilir.} \quad (\text{A 1.22})$$

Aralık faktörü değeri denklem A 1.17 ve denklem A 1.22 kullanılarak iki farklı şekilde hesaplanabilmektedir. Aralık faktörü, $p/A=4,33$ değeri için her iki denklemde eşit olarak hesaplanmaktadır. $p/A > 4,33$ ise, denklem A 1.17 ile aralık faktörü ve özgül yüzey değerlerini çok büyük olarak hesaplamaktadır. Dolayısıyla,

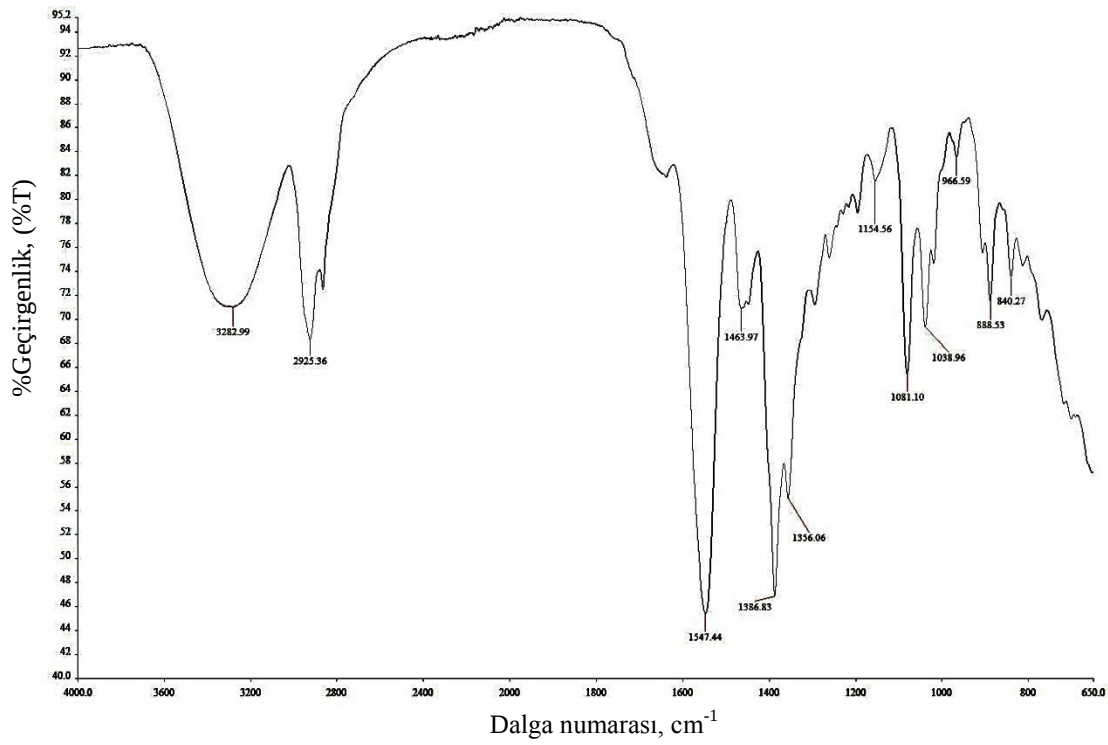
$$p/A < 4,33 \Rightarrow L = \frac{p}{\alpha \cdot A}$$

$$p/A \geq 4,33 \Rightarrow L = \frac{3}{\alpha} \left[1,4 \left(\left(\frac{p+A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \right) - 1 \right] \text{ kullanılmaktadır.}$$

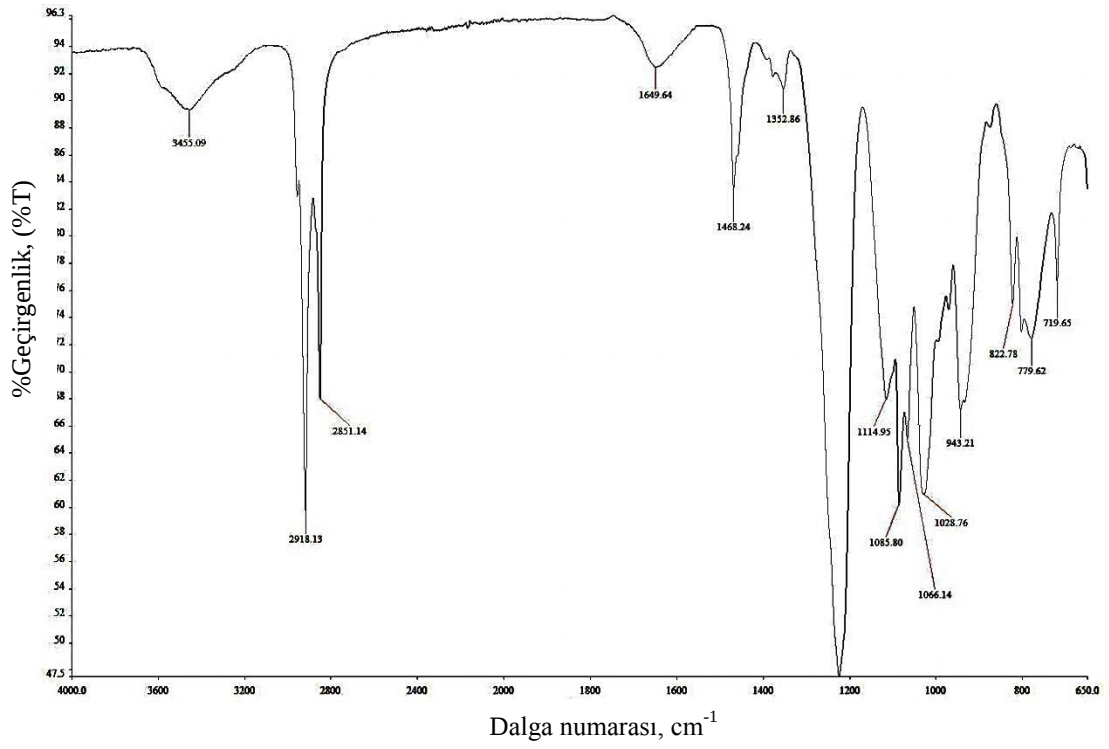
EK B : Hava sürükleyici katkıların FTIR analizleri



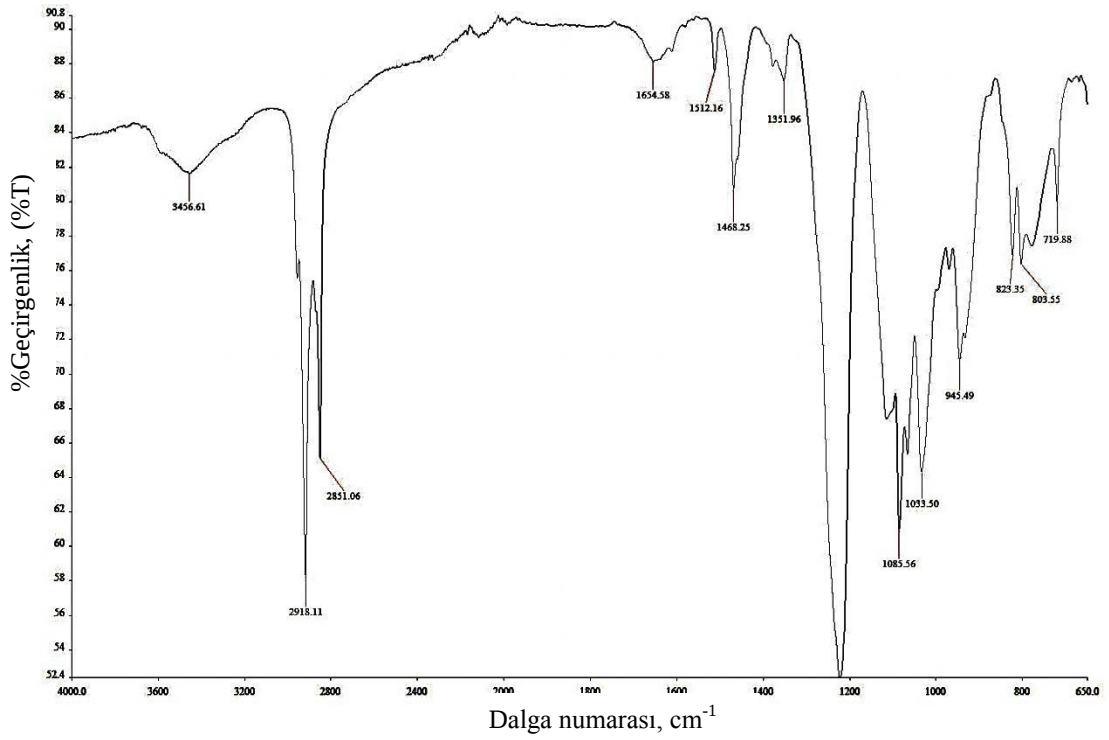
Şekil B.1 : HSK - 1.



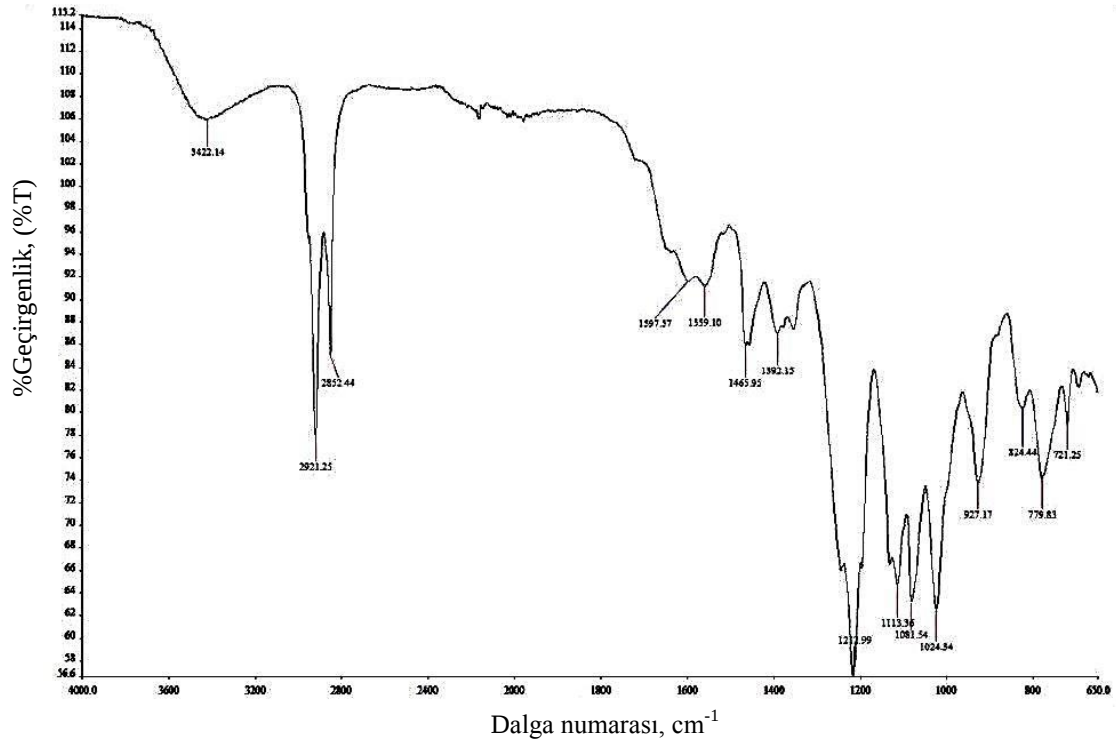
Şekil B.2 : HSK - 2.



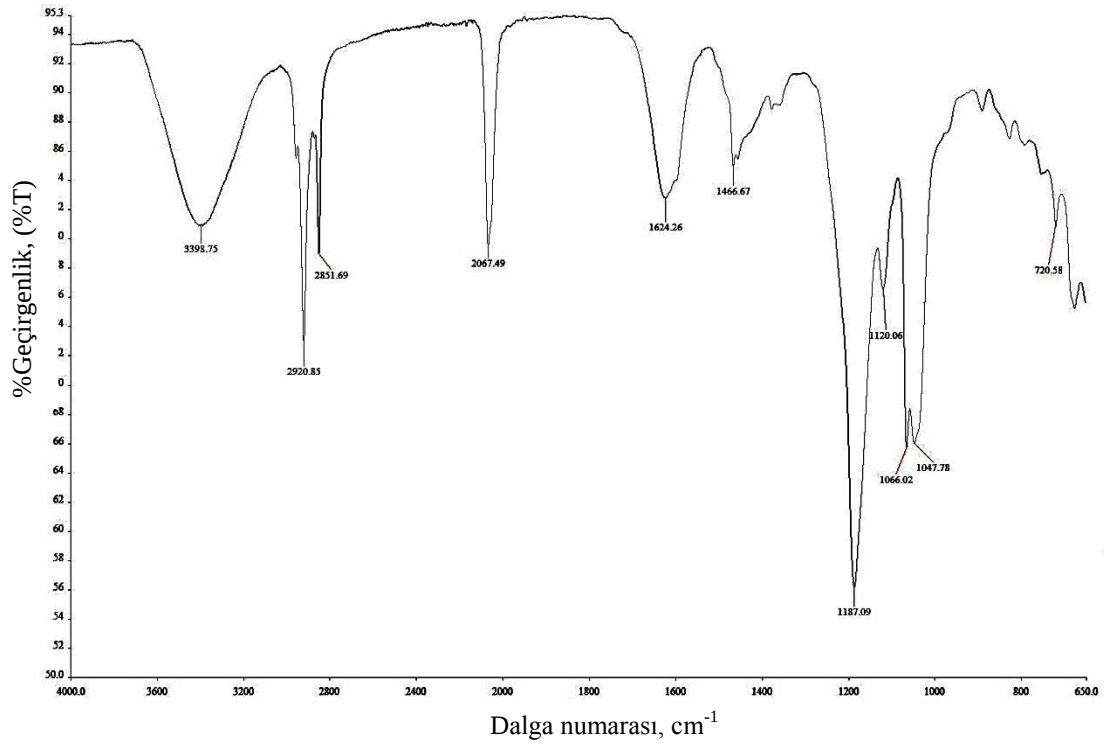
Şekil B.3 : HSK - 3.



Şekil B.4 : HSK - 4.



Şekil B.5 : HSK - 5.



Şekil B.6 : HSK - 6.

EK C : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları**Çizelge C.1 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 1).**

HSK no	Katkı miktarı %	Yüzey gerilimi, mN/m					
		CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N+UK	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R+UK	CEM III/B 32,5 N	CEM III/B 32,5 N+UK
HSK 1	0	66	66	65	66	66	66
	0,004	66	64	63	64	64	64
	0,008	65	63	61	63	63	62
	0,012	64	63	60	63	63	62
	0,016	62	63	60	63	62	61
	0,02	61	62	59	62	61	60
	0,03	61	61	57	61	60	59
	0,04	59	57	56	57	58	57
	0,06	54	54	53	54	54	53
	0,08	53	51	50	51	53	53
	0,12	52	51	49	51	51	49
	0,2	50	50	49	50	50	49

Çizelge C.2 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 2).

HSK no	Katkı miktarı %	Yüzey gerilimi, mN/m					
		CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N+UK	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R+UK	CEM III/B 32,5 N	CEM III/B 32,5 N+UK
HSK 2	0	66	66	65	66	66	66
	0,004	65	65	63	65	63	64
	0,008	64	64	61	63	63	64
	0,012	61	64	60	63	62	64
	0,016	61	62	57	62	59	62
	0,02	58	61	55	61	57	60
	0,03	54	59	54	58	55	56
	0,04	54	54	51	54	54	55
	0,06	53	52	49	52	54	53
	0,08	52	51	48	51	52	53
	0,12	51	49	48	49	48	51
	0,2	46	47	46	48	46	50

Çizelge C.3 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 3).

HSK no	Katkı miktarı %	Yüzey gerilimi, mN/m					
		CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N+UK	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R+UK	CEM III/B 32,5 N	CEM III/B 32,5 N+UK
HSK 3	0	66	66	66	65	65	65
	0,004	60	59	59	57	55	60
	0,008	55	50	54	50	51	50
	0,012	46	47	46	44	48	47
	0,016	43	44	42	42	45	45
	0,02	40	43	40	40	42	43
	0,03	38	39	38	38	40	40
	0,04	36	37	36	37	38	39
	0,06	35	34	35	35	36	38
	0,08	34	34	34	34	35	35
	0,12	-	-	-	-	34	34
	0,2	-	-	-	-	-	-

Çizelge C.4 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 4).

HSK no	Katkı miktarı %	Yüzey gerilimi, mN/m					
		CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N+UK	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R+UK	CEM III/B 32,5 N	CEM III/B 32,5 N+UK
HSK 4	0	65	65	65	66	66	66
	0,004	55	56	58	59	57	58
	0,008	48	50	52	54	52	51
	0,012	45	48	44	46	48	47
	0,016	43	45	42	42	45	45
	0,02	40	42	40	40	42	43
	0,03	38	40	38	38	40	39
	0,04	37	36	36	36	38	38
	0,06	35	34	35	35	36	35
	0,08	34	34	34	34	35	34
	0,12	-	-	-	-	34	-

Çizelge C.5 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 5).

HSK no	Katkı miktarı %	Yüzey gerilimi, mN/m					
		CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N+UK	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R+UK	CEM III/B 32,5 N	CEM III/B 32,5 N+UK
HSK 5	0	66	66	65	66	66	66
	0,004	62	58	58	59	59	60
	0,008	57	55	54	55	57	56
	0,012	50	49	47	48	48	49
	0,016	44	45	44	45	45	45
	0,02	42	44	41	41	42	43
	0,03	40	42	39	40	40	41
	0,04	38	40	38	39	38	39
	0,06	37	38	37	37	37	38
	0,08	35	36	34	35	34	36
	0,12	34	34	-	34	-	34

Çizelge C.6 : Yüzey gerilimi ölçüm sonuçları (HSK 6).

HSK no	Katkı miktarı %	Yüzey gerilimi, mN/m					
		CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N+UK	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R+UK	CEM III/B 32,5 N	CEM III/B 32,5 N+UK
HSK 6	0	66	65	66	65	66	66
	0,002	53	52	51	52	52	51
	0,004	47	46	47	46	47	47
	0,006	44	44	44	44	43	45
	0,008	40	42	43	42	42	44
	0,01	38	39	41	39	40	42
	0,012	37	38	40	38	38	41
	0,016	36	36	38	36	37	39
	0,02	35	35	36	35	35	37
	0,03	34	34	35	34	34	36
	0,04	-	-	34	-	-	35
	0,06	-	-	-	-	-	34

EK D : Köpük drenajı deney sonuçları**Çizelge D.1 : Köpük drenajı deney sonuçları.**

Çimento	HSK no	Sıvı seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
CEM I 42,5 N	1	50	80	95	108	129	150	170	198	215	237	248	258	270
	2	10	20	55	88	149	178	198	212	221	238	248	257	265
	3	15	45	80	128	210	247	268	290	300	303	305	308	310
	4	5	15	35	70	149	190	229	270	292	302	308	309	310
	5	15	32	80	138	228	260	277	297	301	310	310	311	312
	6	0	10	20	30	70	140	171	238	275	293	300	300	301
	HSK no	Köpük seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	690	690	690	690	690	680	670	670	660	640	590	535	420
	2	660	660	660	660	650	650	650	630	615	600	510	500	440
	3	800	800	800	780	725	660	640	620	550	480	460	400	370
	4	840	840	825	800	800	780	770	760	760	710	670	600	570
	5	780	780	760	715	660	610	575	555	540	490	450	440	425
	6	980	980	980	980	980	970	970	970	965	950	925	900	800
Çimento	HSK no	Sıvı seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
CEM I 42,5 N+UK	1	52	78	100	112	134	155	173	200	219	238	250	260	270
	2	13	20	52	90	145	180	197	215	228	238	250	260	270
	3	15	30	70	120	210	247	267	289	300	301	307	309	309
	4	15	20	40	75	140	199	235	277	295	307	309	309	310
	5	18	35	80	150	230	260	279	298	306	309	310	310	311
	6	0	8	15	30	75	140	180	232	280	298	300	301	303
	HSK no	Köpük seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	680	680	680	680	680	675	670	660	650	620	610	485	420
	2	670	670	670	670	665	660	660	650	630	590	500	460	440
	3	835	835	810	790	730	660	615	590	555	475	435	430	380
	4	870	870	860	860	860	855	830	800	780	740	620	540	395
	5	790	790	770	730	670	630	590	560	540	465	450	440	420
	6	998	990	990	990	990	990	980	965	950	930	900	835	748

Çizelge D.1 (devamı) : Köpük drenajı deney sonuçları.

Çimento	HSK no	Sıvı seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
CEM I 42,5 R	1	25	50	92	123	162	190	209	230	240	251	261	268	278
	2	12	21	65	94	155	185	200	220	230	240	250	265	279
	3	18	30	86	170	230	258	272	292	298	303	307	309	309
	4	10	20	43	85	154	210	242	280	298	307	310	310	310
	5	10	45	110	180	248	270	281	299	302	308	309	310	310
	6	0	10	40	80	138	198	228	267	286	299	301	303	305
	HSK no	Köpük seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	660	660	660	660	660	650	650	640	625	610	580	520	410
	2	690	690	690	690	687	685	685	680	670	620	610	440	400
	3	820	820	780	750	700	640	560	525	505	475	430	410	360
	4	835	835	820	820	800	770	750	730	710	690	600	490	365
	5	725	725	700	680	650	600	550	515	495	455	430	410	400
	6	910	910	910	900	900	900	880	850	810	765	730	705	655
CEM I 42,5 R+UK	HSK no	Sıvı seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	20	45	85	109	140	169	188	210	228	240	252	260	270
	2	5	35	70	95	149	180	200	218	228	238	250	260	270
	3	10	30	75	125	220	250	270	290	300	303	306	308	309
	4	0	10	40	80	152	209	240	278	297	305	308	309	310
	5	15	50	115	245	267	282	290	301	305	308	309	310	310
	6	0	5	25	55	109	175	209	253	280	298	300	300	305
	HSK no	Köpük seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	675	675	670	670	670	670	670	660	660	640	570	495	420
	2	660	660	660	660	660	660	660	650	650	585	460	450	420
	3	840	840	800	780	740	660	590	545	520	490	445	430	405
	4	810	800	790	790	760	750	750	720	705	680	600	500	380
	5	670	660	635	600	590	540	510	470	465	440	430	410	400
	6	910	910	900	890	890	890	880	870	840	800	760	720	640

Çizelge D.1 (devamı) : Köpük drenajı deney sonuçları.

Çimento	HSK no	Sıvı seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
CEM III/B 32,5 N	1	20	50	85	105	130	159	178	200	219	239	251	260	270
	2	5	20	50	85	140	179	197	212	222	236	248	258	270
	3	8	20	50	85	167	218	248	279	295	302	307	308	309
	4	0	15	40	75	140	200	232	275	295	302	308	309	310
	5	8	20	65	110	200	240	265	290	301	309	310	311	311
	6	0	5	25	55	100	167	201	251	279	295	300	301	302
	HSK no	Köpük seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	680	680	680	680	675	670	665	665	655	645	600	525	415
	2	670	670	660	660	660	660	660	655	640	600	515	480	425
	3	825	820	810	800	760	710	695	675	645	540	460	420	395
	4	830	830	830	820	810	800	800	800	790	700	540	420	400
	5	770	770	770	770	700	670	650	635	615	535	490	480	455
	6	900	900	900	900	900	890	880	860	840	800	730	680	600
Çimento	HSK no	Sıvı seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
CEM III/B 32,5 N +UK	1	30	65	95	110	138	160	179	203	220	239	253	260	270
	2	0	15	50	85	138	179	193	211	222	235	242	251	270
	3	5	15	50	100	169	219	248	279	296	302	309	309	310
	4	5	15	40	77	145	202	236	278	296	305	308	309	310
	5	15	35	90	170	232	260	278	296	305	309	310	310	311
	6	0	5	20	50	95	160	198	245	280	297	300	301	304
	HSK no	Köpük seviyesi												
		30	1	2	3	5	7,5	10	15	20	30	45	60	90
	1	680	680	680	680	675	670	665	655	650	635	585	520	435
	2	655	655	650	650	650	650	650	640	630	610	570	500	430
	3	820	820	810	800	760	710	700	660	645	565	460	440	405
	4	840	830	825	820	810	800	790	770	760	705	585	490	390
	5	745	740	725	700	650	610	580	555	540	480	455	445	425
	6	936	933	930	927	927	923	913	898	877	843	797	745	663

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Yuşa ŞAHİN

Doğum Yeri ve Tarihi: Yozgat - 1982

Adres : Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yozgat

E-Posta : yusa.sahin@bozok.edu.tr

Lisans : Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik Mimarlık
Fakültesi İnşaat Mühendiliği Bölümü

Yüksek Lisans : Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat
Mühendiliği Ana Bilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

▪ **Şahin, Y.**, Akkaya, Y., Taşdemir, M.A., ve Boylu, F. (2012). Effect of polymer type of air entraining admixtures on surface tension and entrained air system, *7th Asian Symposium on Polymers in Concrete*, ITU, Istanbul, Turkey : October 3-5.

▪ **Şahin, Y.**, Akkaya, Y., ve Taşdemir, M.A. (2012). Freezing and thawing resistance of concrete at high freezing rates, *10th International Congress on Advances in Civil Engineering*, METU, Ankara, Turkey : October 17-19.

