

**HAVA SÜRÜKLEYİCİ VE MİNERAL KATKI
KULLANIMININ ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN
GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE VE DONMA-
ÇÖZÜLME DİRENCİNE ETKİSİ**

Ece GEVEN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA SÜRÜKLEYİCİ VE MİNERAL KATKI KULLANIMININ ÇİMENTOLU
SİSTEMLERİN GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE VE DONMA-ÇÖZÜLME
DİRENCİNE ETKİSİ**

Ece GEVEN
Orcid No: 0000-0001-5490-0205

Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2019

TEZ ONAYI

Ece GEVEN tarafından hazırlanan “HAVA SÜRÜKLEYİCİ VE MİNERAL KATKI KULLANIMININ ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE VE DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

Başkan : Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU
Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Orcid No: 0000-0003-0326-5015

İmza

Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Orcid No: 0000-0002-1867-7103

İmza

Üye : Prof. Dr. İsa YÜKSEL
Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Orcid No: 0000-0002-5176-9990

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

24/07/2019

Ece GEVEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAVA SÜRÜKLEYİCİ VE MİNERAL KATKI KULLANIMININ ÇİMENTOLU SİSTEMLERİN GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE VE DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİNE ETKİSİ

Ece GEVEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

Bu çalışmada, hava sürükleyici ve farklı mineral katkıların çimentolu sistemlerin taze ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca kullanılan mineral ve kimyasal katkıların çimento ile uyumlu olup olmadığı araştırılmıştır. Bu kapsamda tek tip CEM I 42,5R çimento, tek tip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı, tek tip hava sürükleyici katkı (HSK) ve mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak farklı kombinasyonlarda hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. HSK ve mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, üç seri daha karışım hazırlanmıştır. Birinci ve ikinci seride uçucu kül ve silis dumanı sırasıyla, %30 ve %10 oranında çimento ile ikame edilmiştir. Üçüncü seride ise, çimento ağırlığının %30 ve %10 oranı yerine sırasıyla, hem uçucu kül hem de silis dumanı kullanılmıştır. Tüm karışımlarda, çimento ağırlığının %0,1'i oranında HSK ilave edilerek yeni karışımlar hazırlanmıştır. Böylece toplamda sekiz farklı hamur ve harç karışımı üretilmiştir. Tüm çimento hamurlarında, su/çimento oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Tüm harç karışımlarında ise, su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değerleri sırasıyla, 0,485, 2,75 ve 270 ± 20 mm olarak belirlenmiştir. Hamur karışımlarında, Marsh-hunisi ve mini-çökme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Harç karışımlarında ise, zamana bağlı yayılma değişimi, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, 90 günlük su emme kapasitesi ve 90 günlük donma-çözülme direnci ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre, mineral ve hava sürükleyici katkı kullanımı hamur karışımlarının taze hal özelliklerini genel olarak olumlu yönde etkilemiştir. Harç karışımlarında silis dumanı ve uçucu külün hava sürükleyici katkı ile birlikte kullanılması karışımların zamana bağlı yayılma davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir. Mineral katkı kullanımı, karışımların erken yaş dayanımını olumsuz ancak ileri yaş dayanımlarını olumlu etkilemiştir. Karışımlara HSK eklenmesi ile söz konusu bu davranış ciddi mertebede etkilenmemiştir. Mineral katkı kullanımı ile harç karışımlarının 90 günlük su emme değerleri, kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Donma-çözülme direnci bakımından en başarılı karışımın hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren, üçlü bağlayıcı sisteme sahip olan HSK ilaveli karışım olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimentolu Sistemler, Mineral Katkı, Hava Sürükleyici Katkı, Geçirgenlik Özelliği, Donma-Çözülme Dayanımı

2019, x + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EFFECT OF UTILIZATION OF AIR ENTRAINING AND MINERAL ADMIXTURES ON TRANSPORT PROPERTIES AND FREEZE-THAW RESISTANCE OF CEMENTITIOUS SYSTEMS

Ece GEVEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU

In this study, effect of air-entraining and different type mineral admixtures on the fresh and some hardened state properties of cementitious systems were investigated. Moreover, it was also observed whether used mineral and chemical admixtures were compatible with cement or not. For this aim, different paste and mortar mixture combinations were prepared by using a CEM I 42.5R type cement, a polycarboxylate-ether based water reducing admixture, an air entraining admixture (AEA), a silica fume and fly ash as the mineral admixture. In addition to the control mixture containing no AEA and mineral admixtures, three more series of mixtures were prepared. In the first and second series, silica fume and fly ash were replaced by 30 w.t.% and 10 w.t.% of cement, respectively. In the third series, both silica fume and fly ash were used as 30 w.t.% and 10 w.t.% of cement. In all mixtures, new mixtures were prepared by adding AEA at a ratio of 0.1 w.t.% of cement. In this way, a total of eight different pastes and mortar mixtures were produced. In all cement paste mixtures, water/cement ratio (w/c) was kept constant as 0.35. In all mortar mixtures, w/c ratio, sand/binder ratio and flow value were kept constant as 0.485, 2.75 and 270 ± 20 mm, respectively. Marsh funnel and mini-slump tests were carried out in paste mixtures. Time-dependent flow change, 3, 7, 28 and 90-day compressive strengths, 90-day water absorption capacity and 90-day freeze-thaw resistance were measured in mortar mixtures. According to test results, utilization of mineral and air-entraining admixtures positively affected the fresh state properties of paste mixtures. The use of silica fume and fly ash with air entraining admixture in mortar mixtures had a positive effect on the time-dependent flow change behavior of the mixtures. Usage of mineral admixture have a negative effect on the early age strength of the mixtures but have a positive effect on the advanced age strength. This behavior was not significantly affected by the addition of AEA in to the mixtures. The 90-day water absorption values of the mortar mixtures containing mineral admixture were observed to be less compared to that of control mixture. In terms of freeze-thaw resistance, the most successful mixture was found to be mixture having ternary cementitious system such as both fly ash and silica fume and containing AEA.

Key words: Cementitious Systems, Mineral Admixture, Air-Entraining Admixture, Transport Properties, Freeze-Thaw Resistance

2019, x + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak bana rehberlik edip yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Benden yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Arş. Gör. Süleyman ÖZEN'e, İnşaat Mühendisi arkadaşlarım Ali NEMATZADEH'e ve Metin İLHAN'a,

Daima yanımda olup beni destekleyen sevgili Erdem GÜLERYÜZ'e, sadece tez çalışmamda değil, tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak çalışmalarımda kullanılan malzemelerin temin edilmesine yardımcı olan Polisan Kimya San. A.Ş.'a ve Bursa Beton'a teşekkürlerimi sunarım.

Ece GEVEN
24/07/2019

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI..... | 4 |
| 2.1. Mineral Katkılar | 4 |
| 2.1.1. Uçucu kül | 5 |
| 2.1.2. Silis dumanı..... | 7 |
| 2.1.3. Yüksek fırın cürufu | 9 |
| 2.1.4. Metakaolin..... | 11 |
| 2.2. Kimyasal Katkılar | 11 |
| 2.2.1. Süper akışkanlaştırıcı katkı | 13 |
| 2.2.2. Hava sürükleyici katkı..... | 14 |
| 2.3. Beton Durabilitesi | 17 |
| 2.4. Betonun Boşluk Yapısı | 20 |
| 2.5. Betonda Donma-Çözülme Olayı | 23 |
| 2.6. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar | 28 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 38 |
| 3.1. Malzemeler..... | 38 |
| 3.1.1. Çimento | 38 |
| 3.1.2. Uçucu kül | 38 |
| 3.1.3. Silis dumanı..... | 39 |
| 3.1.4. Agrega | 40 |
| 3.1.5. Su azaltıcı katkı..... | 41 |
| 3.1.6. Hava sürükleyici katkı..... | 41 |
| 3.1.7. Su | 41 |
| 3.2. Karışımların Hazırlanması | 41 |
| 3.2.1. Hamur karışımlarının hazırlanması..... | 42 |
| 3.2.2. Harç karışımlarının hazırlanması | 43 |
| 3.3. Çalışma Kapsamında Uygulanan Deneyler | 45 |
| 3.3.1. Hamur karışımları deneyleri | 45 |
| 3.3.2. Harç karışımları deneyleri..... | 46 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA | 51 |
| 4.1. Hamur Deneyleri Sonuçları | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.1.1. Marsh hunisi ve mini yayılma..... | 51 |
| 4.2. Harç Karışımları Sonuçları | 55 |
| 4.2.1. Zamana bağlı yayılma deneyi | 55 |
| 4.2.2. Basınç dayanım deneyi | 58 |
| 4.2.3. Su emme oranı tayini | 60 |
| 4.2.4. Donma-çözülme deneyi | 62 |
| 4.2.5. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin mikroskopik incelemesi.. | 66 |
| 5. SONUÇ | 69 |
| KAYNAKLAR | 72 |
| ÖZGEÇMİŞ | 77 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|--------------------------------|--------------------|
| Al ₂ O ₃ | Alüminyum Oksit |
| dk | Dakika |
| Fe ₂ O ₃ | Demir Oksit |
| g | Gram |
| CaO | Kalsiyum Oksit |
| CaOH ₂ | Kalsiyum Hidroksit |
| Cl ⁻ | Klorür |
| SO ₃ | Kükürt Trioksit |
| MgO | Magnezyum Oksit |
| MPa | Megapaskal |
| µm | Mikrometre |
| mm | Milimetre |
| ml | Mililitre |
| nm | Nanometre |
| K ₂ O | Potasyum Oksit |
| sn | Saniye |
| °C | Santigrat derece |
| cm | Santimetre |
| SiO ₂ | Silisyum Dioksit |
| Na ₂ O | Sodyum Oksit |
| % | Yüzde |

Açıklama

Kısaltmalar

| | |
|------|--|
| ACAA | American Coal Ash Association |
| ACI | American Concrete Institute |
| AEA | Air Entraining Admixture |
| ASTM | American Society For Testing And Materials |
| AVA | Air Void Analyzer |
| CEM | Cement |
| CEN | Standart Kum |
| CH | Kalsiyum Hidroksit |
| CSH | Kalsiyum Silika Hidrat |
| DÇ | Donma-Çözülme |
| GPA | Genleştirilmiş Perlit Agregası |
| HSK | Hava Sürükleyici Katkı |
| KYB | Kendiliğinden Yerleşen Beton |
| K | Kontrol (karışımı) |
| K/B | Kum Bağlayıcı Oranı |
| MK | Metakaolin |
| MLS | Modifiye Edilmiş Lignosülfonatlar |
| PA | Perlit Agregası |

Açıklama

| | |
|-------|-------------------------------------|
| S/B | Su Bağlayıcı Oranı |
| S/Ç | Su Çimento Oranı |
| SAK | Süperakışkanlaştırıcı Katkı |
| SD | Silis Dumanı |
| SEM | Scene Electron Microscope |
| SMF | Sülfolanmış Melamin-Formaldehit |
| SNF | Sülfolanmış Naftalin-Formaldehit |
| TS EN | Türk Standartları, EN: Avrupa Normu |
| TÜİK | Türkiye İstatistik Kurumu |
| UK | Uçucu Kül |
| W/C | Water/Cement (su/çimento) |
| YFC | Yüksek Fırın Cürufu |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1. | Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Uludağ Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı | 3 |
| Şekil 2.1. | Uçucu kül tanelerinin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü | 7 |
| Şekil 2.2. | Silis dumanı tanelerinin mikroskop görüntüsü..... | 8 |
| Şekil 2.3. | Yüksek fırın cürufu üretim süreci | 10 |
| Şekil 2.4. | Kimyasal katkı örnekleri | 12 |
| Şekil 2.5. | Kimyasal katkıların yarattığı sinerji | 13 |
| Şekil 2.6. | Akışkanlaştırıcı katkıların stearik etkisi..... | 14 |
| Şekil 2.7. | Hava sürükleyici katkı moleküllerinin tipik kimyasal yapısı..... | 15 |
| Şekil 2.8. | Hava sürükleyici katkıların çalışma mekanizması | 15 |
| Şekil 2.9. | Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması | 19 |
| Şekil 2.10. | Çimento hamurunda bulunan boşluklar | 21 |
| Şekil 2.11. | Donma-çözülme çevrimi sonrası hasar gören Denizli İli-Işıklı İlçesi betonarme döşeme..... | 27 |
| Şekil 2.12. | Uşak İli-Eşme İlçesi betonarme temel | 27 |
| Şekil 2.13. | Çimento yerine %5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında uçucu kül ikamesi ile hazırlanan karışımların, 15x15 küp beton dayanım değerleri | 30 |
| Şekil 2.14. | 60 günlük numunelerin su emme değerleri | 31 |
| Şekil 2.15. | 28 günlük numunelerin basınç dayanım değerleri, Mpa..... | 34 |
| Şekil 2.16. | Uçucu kül ve çimento parçacıklarının hava boşlukları ile ilişkisi..... | 37 |
| Şekil 3.1. | Çalışmaların gerçekleştirildiği U.Ü Yapı Malzemeleri laboratuvarından bir görüntü | 42 |
| Şekil 3.2. | Numunelerin kür havuzundaki görüntüleri | 45 |
| Şekil 3.3. | Marsh-hunisi ve mini-yayılma deneylerinde kullanılan aletler..... | 46 |
| Şekil 3.4. | Yayılma tablası ve kesik koni şekilli kalıp..... | 47 |
| Şekil 3.5. | Basınç dayanımı ölçümü | 47 |
| Şekil 3.6. | Su emme deneyi için kullanılan etüv görüntüsü | 48 |
| Şekil 3.7. | Donma-çözülme deneyi takip ekranı..... | 49 |
| Şekil 3.8. | Donma-çözülme deney kabini..... | 50 |
| Şekil 3.9. | Donma-çözülme kabinine yerleştirilen numuneler | 50 |
| Şekil 4.1. | HSK içermeyen hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süreleri..... | 53 |
| Şekil 4.2. | HSK içeren hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süreleri | 55 |
| Şekil 4.3. | HSK içermeyen harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri..... | 57 |
| Şekil 4.4. | HSK içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri | 58 |
| Şekil 4.5. | Harç karışımlarının basınç dayanımları (MPa) | 59 |
| Şekil 4.6. | HSK içeren harç karışımlarının basınç dayanımları (MPa) | 60 |
| Şekil 4.7. | Harç karışımlarının 90 günlük su emme oranı | 61 |
| Şekil 4.8. | HSK içeren harç karışımlarının 90 günlük su emme oranı | 62 |
| Şekil 4.9. | HSK içermeyen 90 günlük numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası bağlı basınç dayanım değerleri..... | 63 |
| Şekil 4.10. | HSK içeren 90 günlük numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası bağlı basınç dayanım değerleri..... | 65 |

- Şekil 4.11. 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen K numunesi; (b) HSK içeren K-HSK numunesi. 67
- Şekil 4.12. 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen UK numunesi; (b) HSK içeren UK-HSK numunesi. 67
- Şekil 4.13. 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen SD numunesi; (b) HSK içeren SD-HSK numunesi 68
- Şekil 4.14. 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen K-UK-SD numunesi; (b) HSK içeren K-UK-SD-HSK numunesi..... 68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | | |
|--------------|--|----|
| Çizelge 2.1. | Uçucu küllerin fiziksel özellikleri | 6 |
| Çizelge 2.2. | Donma-çözölmeye maruz betonlar için önerilen hava içerikleri | 16 |
| Çizelge 2.3. | Donma-çözölme dayanıklılığını etkileyen faktörler..... | 28 |
| Çizelge 2.4. | Çalışmada üretilen karışımların basınç dayanım oranları | 29 |
| Çizelge 2.5. | Çalışmada üretilen karışımların permeabilite oranları | 30 |
| Çizelge 2.6. | Kullanılan hava sürükleyici katkılara ait teknik bilgiler | 35 |
| Çizelge 2.7. | Numunelerin 0, 7, 14, 28 ve 56 DÇ çevrimi sonrasında basınç dayanımları, N/mm ² | 36 |
| Çizelge 3.1. | Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri | 38 |
| Çizelge 3.2. | Uçucu külün kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri..... | 39 |
| Çizelge 3.3. | Silis dumanının kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri | 40 |
| Çizelge 3.4. | Standart kumun tane boyu dağılımı..... | 40 |
| Çizelge 3.5. | Süper akışkanlaştırıcı katkı özellikleri | 41 |
| Çizelge 3.6. | Hava sürükleyici katkı özellikleri..... | 41 |
| Çizelge 3.7. | Hamur karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları(g) ve yayılma değerleri (mm)..... | 43 |
| Çizelge 3.8. | Mineral katkı içeren harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri | 44 |
| Çizelge 3.9. | Mineral katkı ve hava sürükleyici katkı içeren harç karışımların üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri | 44 |
| Çizelge 4.1. | HSK içermeyen hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri | 52 |
| Çizelge 4.2. | HSK içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri..... | 54 |
| Çizelge 4.3. | HSK içermeyen harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri (mm) | 56 |
| Çizelge 4.4. | HSK içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri (mm).. | 58 |
| Çizelge 4.5. | HSK içermeyen 90 günlük numunelerin donma-çözölme deneyi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri | 63 |
| Çizelge 4.6. | 90 gün kür edilmiş HSK içeren numunelerin 50-200 donma-çözölme çevrimi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri | 64 |

1. GİRİŞ

Yapıların servis ömrünün uzun olmasını sağlamak için doğru taşıyıcı sistem seçimi, projelendirilmesi ve imâl edilmesinin yanı sıra kalıcılığını artıracak önlemler de alınmalı, yapının en az bakım gerektirecek şekilde tasarımı yapılmalıdır. Kalıcılığı iyi olan bir betonda mekanik yükler dışında maruz kaldığı kimyasal ve fiziksel etkilere karşı dayanıklı olması hedeflenmektedir. Bu fiziksel etkilere sürtünme, darbe, kavitasyon, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi nedenler, kimyasal etkilere ise asit, klorür, sülfat, karbonatlaşma, donatı-korozyonu ve alkali-silika reaksiyonu gibi nedenler sebebiyet verebilir (Mather 2004).

Karasal iklim gibi sert iklim koşullarının görüldüğü bölgelerde binaların dış cepheleri, köprülerin taşıyıcı kolon ve kirişleri, barajlar, istinat duvarları, beton yol döşemeleri ve hava meydanı pistleri gibi yüzeyleri atmosfer etkilerine açık kalacak betonarme elemanlarda beton kalıcılığının karşısındaki en büyük tehditlerden birisi donma-çözülme olayıdır (Shang ve Song 2008). Beton ve çimento hamuru içerisindeki kapiler boşluklarda bulunan su düşük sıcaklıklarda %9 oranında genişerek buz kütesine dönüşür. Genleşen su, beton bünyesinde içsel gerilmelere yol açar ve çatlaklara sebep olur (Baradan ve ark 2012). Betonun donma-çözülme direncini artırmak amacıyla hava sürükleyici katkı (HSK) kullanılabilir. Bu kimyasal katkı maddesiyle beton içinde homojen dağılmış, boyutları 10 µm'den birkaç mm'ye ulaşabilen, birbirlerinden bağımsız küresel hava boşlukları oluşturulur. Bu boşluklar hem betonun kılcal yolla su emmesini engeller hem de donan suyun oluşturduğu buz kütesinin, dışarıya çıkmaya zorladığı henüz donmamış olan suların boşluk içine doğru ilerlemesini sağlayarak, suyun boşluk çeperlerine basınç uygulamasını önler (Pigeon ve Pleau 1995, Neville 1997).

Günümüzde, beton teknolojisinin gelişimi ile beraber beton üretiminde kimyasal ve mineral katkı kullanımı yaygınlaşmıştır. Artık katkısız beton üretmek pek mümkün değildir. Beton üretiminde kullanılan mineral katkıların başında puzolanik özelliğe sahip olan uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), metakaolin (MK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) gelmektedir (Erdoğan 2010).

Bilindiği gibi, çimentolu sistemlerde mineral katkı kullanımı oluşturduğu fiziko-kimyasal etkilerden dolayı çimentolu sistemlerin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Fiziksel olarak, mineral katkılar çok ince malzeme olduklarından dolayı çimentolu sistemlerin boşluklarını tıkayarak daha boşluksuz bir yapının oluşumunu sağlamaktadırlar. Kimyasal olarak, puzolanik reaksiyon sonucu kalsiyum hidroksitleri (CH) daha güçlü bir yapıya sahip olan ve çimentolu sistemlere bağlayıcılık özelliği kazandıran kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüştürmektedir. Mineral katkıların inceliği, amorflik derecesi ve kimyasal bileşimi puzolanik reaksiyonu ciddi mertebede etkilemektedir. Dolayısıyla mineral katkıların ince olması ve içerdiği reaktif silisin fazla olması durumunda puzolanik reaksiyonun oluşumu daha erken yaşlarda gerçekleşmektedir (Mehta ve Monteiro 2010).

Amaç, konu ve kapsam

Bu çalışmada mineral katkı ve hava sürükleyici katkı kullanımının, çimentolu sistemlerin taze hal, dayanım ve bazı dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma iki aşamalı planlanmış olup birinci aşamada, kontrol karışımına ilaveten, silis dumanı ve uçucu külün farklı oranlarda çimento yerine kullanılmasıyla ikili ve üçlü bağlayıcı sisteme sahip üç farklı hamur ve harç karışımları hazırlanmıştır. İkili bağlayıcı sisteme sahip birinci ve ikinci serilerde, çimentonun yerine ağırlıkça sırasıyla, %30 ve %10 oranında uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Üçlü bağlayıcı sisteme sahip hamur ve harç karışımlarında, çimento ağırlığının %30'u ve %10'u oranında sırasıyla, uçucu kül ve silis dumanı çimento yerine kullanılmıştır. Tekli bağlayıcı sisteme sahip kontrol karışımında ise bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılmıştır. Karışımların isimlendirilmesi içerdiği mineral katkı türüne göre yapılmıştır. Örneğin mineral katkı içermeyen tekli bağlayıcı sisteme sahip kontrol karışımı K ile adlandırılırken, uçucu kül içeren karışım UK, silis dumanı içeren karışım SD olarak adlandırılmıştır. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı sisteme sahip karışım K-UK-SD olarak adlandırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında; karışım oranları yukarıda belirtilen söz konusu kontrol ve mineral katkılı karışımların her birisine çimento ağırlığının %0,1'i oranında hava sürükleyici katkı ilavesi yapılarak dört farklı hamur ve harç karışımı elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, mineral katkı içeren hamur ve harç karışımlarında hava sürükleyici katkı kullanımının etkisi incelenmiş ve sonuçlar

karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İkinci aşama olarak planlanan bu kısımda, karışımların isimlendirmesi K-HSK, UK-HSK, SD-HSK ve K-UK-SD-HSK olarak yapılmıştır.

İki aşamanın sonunda, toplamda 8 seri karışım üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve kıyaslamalar yapılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Uludağ Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan deneyleri aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür;

- Taze hal özelliklerinin belirlenmesi: Sadece Portland çimentosu kullanılarak üretilen kontrol karışımı ve farklı oranlarda katkıların da kullanıldığı, toplamda 8 seri hamur karışımın Marsh-Hunisi akış süreleri, mini-yayılma ve sıcaklık değerleri standartlara uygun yöntemlerle belirlenmiştir. Ayrıca 8 seri harç karışımının, zamana bağlı yayılma değerleri tespit edilmiştir.
- Mekanik özelliklerin belirlenmesi: 8 seri karışımın 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı tespit edilmiştir.
- Durabilite özelliklerinin belirlenmesi: 8 seri karışıma ait numunelerin, 90 gün kürlenme sonunda su emme ve 200 donma-çözülme çevrimi sonrasında basınç dayanım kayıpları belirlenmiştir.



Şekil 1.1. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Uludağ Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Mineral Katkılar

ASTM C 618-94a (1994) standardına göre, mineral katkılar “kendi başlarına çok az veya hiç bağlayıcı özelliği olmayan, ancak çok ince bir şekilde öğütüldüğünde nemli ortamlarda ve normal sıcaklıkta sönmüş kireç ile kimyasal reaksiyona girerek, bağlayıcılık özelliği kazanan maddelerdir.” şeklinde tanımlanmaktadır.

Mineral katkı malzemeleri taze betonun işlenebilme, ayrışma, su ihtiyacı, terleme, hava sürüklenme, plastik rötre, hidrasyon ısı gibi özelliklerine etki eder (Özturan 1993). Bunun yanı sıra, sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini, alkali-silika reaksiyonunu azaltma ve betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırma gibi pek çok olumlu etkisi vardır. Beton üretiminde kullanılan mineral katkıların başında puzolanik özelliğe sahip olan UK, SD, MK ve YFC gelmektedir (Erdoğan 2010).

Bilindiği gibi, çimentolu sistemlerde mineral katkı kullanımı oluşturduğu fiziko-kimyasal etkilerden dolayı çimentolu sistemlerin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Fiziksel olarak, mineral katkılar çok ince malzeme olduklarından dolayı çimentolu sistemlerin boşluklarını tıkayarak daha boşluksuz bir yapının oluşumunu sağlamaktadırlar. Kimyasal olarak, puzolanik reaksiyon sonucu kalsiyum hidroksitleri (CH) daha güçlü bir yapıya sahip olan ve çimentolu sistemlere bağlayıcılık özelliği kazandıran kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüştürmektedir. Mineral katkıların inceliği, amorflik derecesi ve kimyasal bileşimi puzolanik reaksiyonu ciddi mertebede etkilemektedir. Dolayısıyla mineral katkıların ince olması ve içerdiği reaktif silisin fazla olması durumunda puzolanik reaksiyonun oluşumu daha erken yaşlarda gerçekleşmektedir (Mehta ve Monteiro 2010).

Beton üretiminde kullanılan ince taneli mineral katkı malzemelerinin olumlu etkileri aşağıda sıralanmıştır.

- İşlenebilmeyi arttırmaktadır,
- Terlemeyi ve segregasyonu azaltmaktadır,
- Hidrasyon ısısının ortaya çıkma hızını ve miktarını azaltmaktadır,

- Su geçirgenliğini azaltmaktadır,
- Alkali-agrega reaksiyonunu azaltmaktadır,
- Sülfat hücumlarına karşı dayanıklılığı arttırmaktadır,
- Nihai basınç dayanımının daha yüksek olmasına sağlamaktadır,
- Ekonomiklik sağlamaktadır.

Tüm bu olumlu etkilerin yanı sıra puzolanik katkı maddelerinin kullanımında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar mevcuttur. Mineral katkı kullanımı ile özellikle soğuk hava koşullarında priz alma işlemi gecikmekte ve hidrasyon yavaşlayacağı için genellikle erken yaş dayanımları katkısız betona kıyasla daha az olmaktadır. Ayrıca, mineral katkı içeren betonda istenilen miktarda sürüklenmiş hava boşluklarının oluşumunu sağlamak amacıyla, mineral katkı içermeyen betonda kullanılan daha yüksek miktarda hava sürükleyici katkının kullanılması gerekebilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan 2007).

2.1.1. Uçucu kül

Termik santrallerde pulverize kömürün buhar üretici kazanları ısıtmak üzere yakılmasıyla ortaya çıkan küllerin, kaba olan kısmı kazan tabanına düşer ve taban külü ismini alır. Ortaya çıkan küllerin ince kısmı ise gazlarla birlikte uçarak atmosfere çıkmak üzere hareket eder. Bacalarda bulunan elektrofiltreler yardımıyla tutulan silt boyutlu bu ince malzemeye uçucu kül denir. (ASTM C 618-94a 2010)

Uçucu küllerin sınıflandırılması, ASTM C 618 ve TS EN 197-1'e göre kimyasal bileşen yüzdesi esas alınarak yapılmaktadır. ASTM C 618 standardına göre, uçucu külleri F ve C olmak üzere iki gruba ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan ve CaO yüzdesi %10'un altında olan, düşük kireçli olarak da adlandırılan puzolanik özelliğe sahip olan küllerdir. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla, CaO miktarı %10'dan fazla olan, yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılan küllerdir.

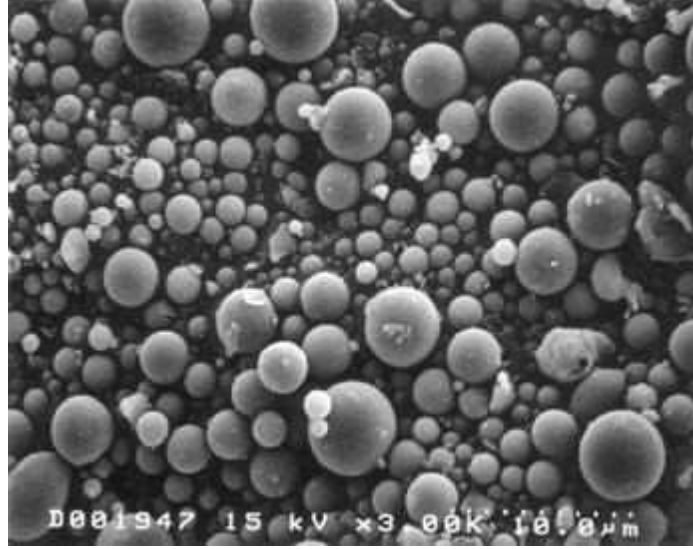
TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada ise uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ' den oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren, çoğunluğu puzolanik özelliğe sahip olan küresel taneciklerden meydana gelen küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'ten fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan esas olarak reaktif CaO, reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif CaO oranının %10'dan, reaktif silis miktarının da %25'ten fazla olması gerekmektedir.

Yakılan kömürün yapısı, jeolojik kökeni ve işlem koşulları uçucu küllerin kimyasal bileşimi ile bağlantılıdır. Puzolanik aktivitesi ise yapısında bulunan amorf silika ve alüminanın varlığına bağlıdır (Baker 1984, Naik ve Singh 1997). Bazı araştırmacılara göre; uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal kompozisyonlarından daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Bu bağlamda uçucu küller, düşük kireçli ve yüksek kireçli olarak isimlendirilebilirler. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan amorf ya da camsı fazdır ve rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH_2) ile tepkimeye girerek puzolanik özellik kazanırlar. Yüksek kireçli uçucu küller ise, puzolanik özelliklerinin yanı sıra yapısında bulunan serbest kireç, trikalsiyum alüminat, amorf silis ve alümina vb. sayesinde kendi başlarına bir miktar bağlayıcılık özelliği gösterirler (Mehta 1986, Tokyay ve Erdoğan 1993).

Yapılan araştırmalara göre, uçucu küllerin genellikle $45 \mu\text{m}$ 'den küçük tane boyutuna sahip olduğu, uçucu kül tane boyutu aralığının 1 mikronun altından, 150 mikronun üstüne çıkabildiği kabul edilmektedir. UK içeren betonların donma-çözülme direnci, dayanım ve aşınma direnci özelliklerinin, UK inceliğinin bir fonksiyonu olduğu anlaşılmıştır (Lane ve Best 1982). Uçucu küllerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de (Tokyay 1993) ve American Coal Ash Association (ACAA) verilerine göre 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Anonim 2003).

Çizelge 2.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Tokyay 1993)

| Çap (μm) | Şekil-Renk | Yoğunluk (g/cm^3) | İncelik |
|-----------------------|--------------|-------------------------------------|---------------------|
| 1– 200 | Yuvarlak-Gri | 2,2 – 2,7 | Çimento inceliğinde |



Şekil 2.1. Uçucu kül tanelerinin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü (ACAA 2003).

Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) verilerine göre, ülkemizde termik santrallerde 2003 yılında 11,84 milyon ton, 2004 yılında 13,34 milyon ton ve 2006 yılında 16,01 milyon ton UK açığa çıkmıştır. 2003-2006 yılları arasında oluşan atığın ortalama %10'u tesis dışında geri kazanılmış, % 90'ı ise bertaraf edilmiştir. Türkiye'de 2020 yılına kadar yıllık uçucu kül miktarının 50 milyon tonu geçmesi beklenmektedir (Anonim 2008).

Uçucu kül, çimento yerine, çimentonun hammaddesi olarak, tuğla, beton, yalıtım malzemesi üretiminde, barajlarda ve yol alt temel tabakaları gibi inşaat endüstrisinin birçok dalında kullanım olanağına sahiptir (Erdoğan 2003).

Günümüzde atık madde olarak ortaya çıkan uçucu küllerin geri dönüşümünün sağlanması, çevresel ve ekonomik bakımdan tüm dünyada büyük önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalara göre uçucu külün kullanım miktarının artması ve yeni kullanım alanlarının oluşturulması yönündeki çalışmalara ağırlık verilmesi gerekmektedir (Görhan ve ark. 2008).

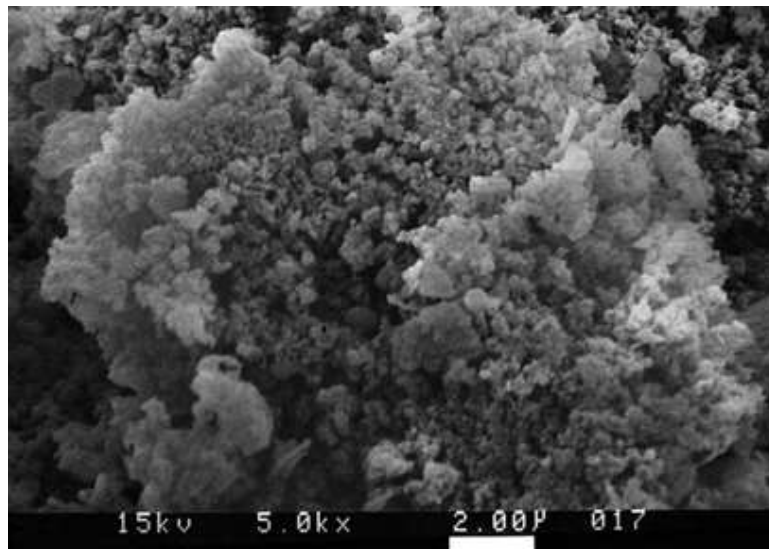
2.1.2. Silis dumanı

Yüksek saflıktaki kuvarsın yaklaşık 2000 °C sıcaklıktaki elektrik fırınlarında kömürle indirgenmesiyle silisyum metali veya alaşımlarının elde edilmesi mümkündür. Bu işlem esnasında oluşan SiO gazının, fırının nispeten soğuk kısmında havadaki oksijenle

oksitlenmesi sonucunda ortaya çıkan camsı yapıdaki SiO_2 'nin fiber filtrelerden geçirildikten sonra yoğunlaştırılmasıyla silis dumanı elde edilmektedir (Yeğınobalı 2003).

Üretilen silikon metali veya silikonlu metal alaşımın türüne göre silis dumanının kimyasal kompozisyonu değişebilmektedir. Esas bileşeni kristalize olmayan amorf haldeki silistir. İkinci esas bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır. Yapısında bulunan SiO_2 içeriği %85'in üzerinde, Fe_2O_3 içeriği ise %1 ile %2 civarındadır. Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Na_2O ve K_2O gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur (Akçaözoğlu 2007).

Silis dumanının tane boyutları 0.1-0.2 μm arasında ve özgül yüzey alanı yaklaşık olarak 20,000 m^2/kg civarındadır (Baradan ve ark. 2012). Silis dumanı, Normal Portland çimentosuna kıyasla yaklaşık 100 kat daha incedir. Silis dumanı inceliği sayesinde, çimento taneciklerinin arasında bulunan ince boşlukları doldurarak orada bulunan suların serbest suya dönüşmesini sağlamaktadır. Buna karşılık Normal Portland çimentosuyla kıyaslandığında çökme değerlerinde yaklaşık %70 oranında bir azalma meydana gelmektedir. Günümüzde, silis dumanı kullanımıyla artan su ihtiyacını kontrol edebilmek amacıyla karışımlarda süper ya da hiper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır (Yeğınobalı 2003). Silis dumanı tanelerinin mikroskopik görüntüsü (SEM 20,000X.) Şekil 2.2'de verilmiştir (Kordi ve Machaka 2014).



Şekil 2.2. Silis dumanı tanelerinin mikroskop görüntüsü (Kordi ve Machaka 2014)

Silis dumanının beton içindeki davranışı fiziko-kimyasaldır. Fiziksel olarak, inceliği sayesinde agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde bulunan boşlukları tıkayarak gözeneklerin azalmasını sağlar. Kimyasal olarak ise, çimento hamuru ile agrega arasında zayıflık gösteren kalsiyum-hidroksit (CH) kristallerini kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) jellerine dönüştüren puzolanik reaksiyon oluşumunu sağlarlar (Tautanji ve Bayasi 1999, Özturan 1993). Bu davranış sonucunda silis dumanı, beton basınç ve çekme dayanımını artırmasının yanı sıra durabilite ve geçirimsizlik özelliklerini de iyileştirmektedir (Tautanji ve Bayasi 1999).

Silis dumanı kullanılarak elde edilen bir beton, normal Portland çimentosu kullanılarak elde edilen bir betona kıyasla daha kohezif yapıdadır. Silis dumanlı betonlarda, ince katı parçacıklar arasında temas yüzeyinin artışına bağlı olarak oluşan kohezyon sebebiyle işlenebilirlik azalmaktadır. (Erdoğan 2003). Rao (2003), harcın hava içeriğinin ve işlenebilirliğinin, kullanılan silis dumanı miktarıyla ters orantılı olduğunu belirtmektedir. Araştırmalara göre, çimento ağırlığının %5'inden daha yüksek miktarlarda silis dumanı kullanılması ile beton daha kohezif bir yapıya sahip olmaktadır (Erdoğan 2003). Silis dumanı, taze betonda işlenebilirliği azaltırken sertleşmiş betonun da bir çok özelliğini iyileştirmektedir (Khayat ve Aitcin 1992)

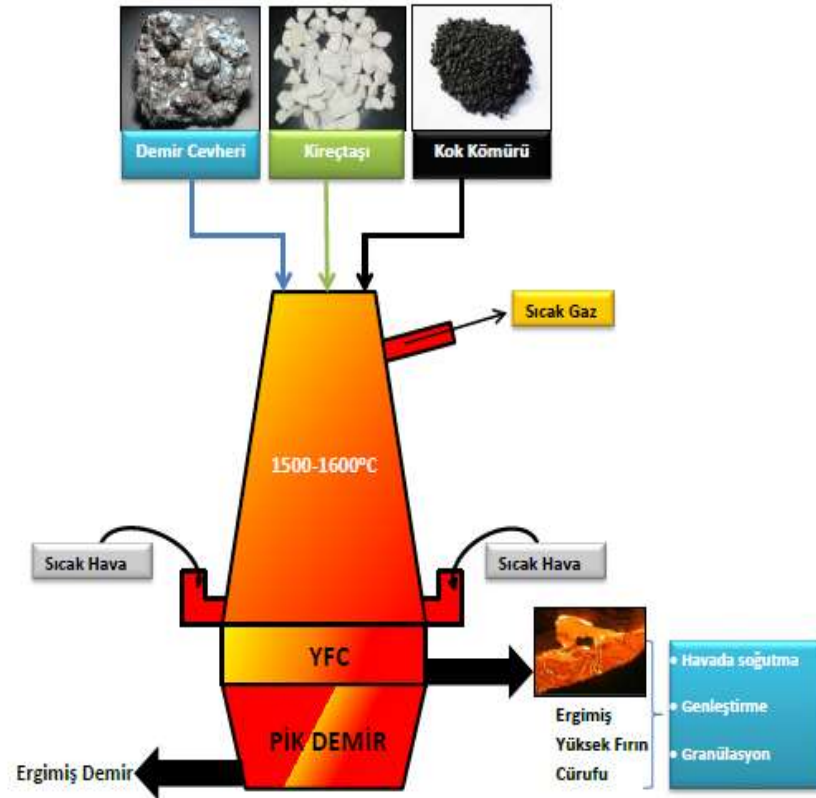
Betondaki optimum silis dumanı miktarı tüm bu etkilerin göreceli değerlerine bağlıdır ve çimento, agrega ve akışkanlaştırıcı katkının tipi ve miktarları ile bakım koşulları gibi faktörlerden etkilenmektedir (Jahren 1993) ve günümüzde katkı malzemesi olarak sıkça tercih edilmektedir.

2.1.3. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), ham demir üretimi amacıyla; demir filizi, kok kömürü ve kireç taşının bir arada ergitilmesi sonucunda elde edilmektedir. Daha hafif olmasından dolayı ham demirin üstünde yer alan ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilen granüle yüksek fırın cürufu ise, yapısında kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf bulundurur ve uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir (Tokyay ve Erdoğan 1998). Yüksek fırın cürufu üretim süreci Şekil 2.3'te verilmiştir (<http://www.betonvecimento.com/>, 2019).

Granüle yüksek fırın cürufunun elde edilmesine dair bilinen ilk çalışmalar, 1862 yılında Alman Emil Langen tarafından başlatılmıştır (ACI-226 1994). 1865 yılında ise “öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve söndürülmüş kireç” karışımı bir çimento türü olarak yine Almanya’daki bir fabrikada üretilmeye başlanmıştır. Üretilen bu çimento türü 1889 yılında Fransa’da Paris metrosunun yapımında da kullanılmıştır (Erdoğan ve Erdoğan, 2005).

Cüruf kullanılan beton dayanımı; malzemenin inceliğine, karışımın cüruf/çimento oranına ve cürufun aktivite indeksi gibi parametrelere bağlıdır. İnce öğütülmüş cürufun betonda kullanımı, işlenebilirliği artırır, daha az su absorbe eder ve terlemeyi azaltır (Mehta ve Monteiro 2010).



Şekil 2.3. Yüksek fırın cürufu üretim süreci (<http://www.betonvecimento.com/>, 2019)

2.1.4. Metakaolin

Metakaolin, saf haldeki kilin yaklaşık 700 °C sıcaklıkta pişirilmesi ve daha sonra yüksek inceliğe sahip olması amacıyla öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır (Vu 2002).

Kimyasal olarak metakaolinin esas bileşenleri SiO₂ ve Al₂O₃ tür. Bununla birlikte Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O ve K₂O da az miktarlarda bulunur. Metakaolinin mineral katkı olarak çimento ve beton içerisinde kullanılması sonucu çimento ve betona sağlayacağı faydalar daha çok SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğine bağlıdır (Vu 2002).

Metakaolin ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı için hazırlanan betonda kullanılmış ancak 1990'lı yıllarda betonda kullanımı yaygınlaşmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda betonun bir çok özelliğini iyileştirdiği görülmüştür (Pera 2001).

Yapılan çalışmalarda, belli bir orana kadar MK kullanımının çimento harcının dayanım ve durabilitesi üzerine olumlu etkisi gözlenmektedir. Yüksek oranlarda MK kullanımı çimento karışımının su ihtiyacını arttırdığından akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılması gerekmektedir. MK katkısının boşluk doldurucu etkisinin ve puzolanik aktivitesinin 28 günlük dayanımlarda etkili olmaya başladığı düşünülmektedir (Tosun ve ark. 2007).

2.2. Kimyasal Katkılar

Beton teknolojisinde su içerisinde çözünebilen katkı maddeleri kimyasal katkı olarak adlandırılırlar(98 ACI-105). Kimyasal katkılar mineral katkılara kıyasla çok daha az miktarda (çimento ağırlığının % 0.1-5'i arası) betonda kullanılırlar (Erdoğan 2003). TS EN 934-2'ye göre, beton yapımında kullanılacak kimyasal katkı maddeleri, çimento kütlelerinin %5'inden fazla olmamalıdır. Önerilenden daha fazla miktarlarda kullanılmaları durumunda betonun çökmesi ve stabilitesi üzerinde olumsuz etki yapabilmektedirler (Erdoğan 2010).

Kimyasal katkıların gelişimi 1940'lı yıllardan itibaren artmış ve o yıllarda İngiltere'de 275, Almanya'da 340 kimyasal katkı çeşidinin kullanıldığı belirtilmiştir. Türkiye'de ise doksanlı yılların başında hazır beton sektöründe kimyasal katkı kullanım oranı %20'yi

bulmazken, bugün hazır beton endüstrisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Ramachandran ve Malhotra 1984).

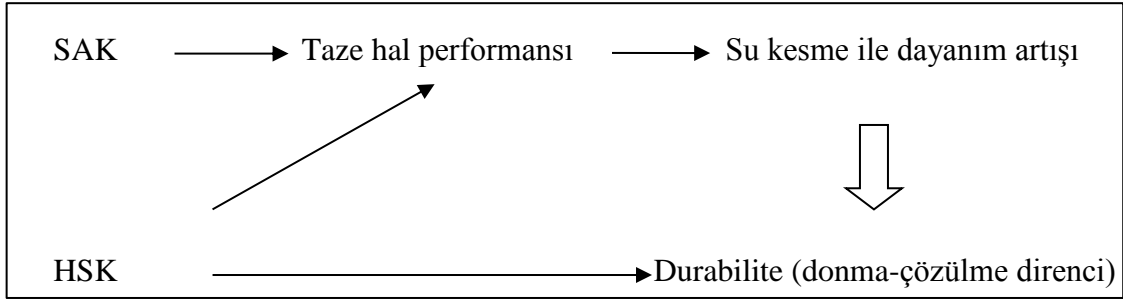
Kimyasal katkı maddeleri, ilgili standart TS EN 934-2'de (2002) aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır;

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



Şekil 2.4. Kimyasal katkı örnekleri

Bu çalışmada, süper akışkanlaştırıcı katkı (SAK) ve hava sürükleyici katkı (HSK) malzemeleri kullanılmıştır. Kimyasal katkıların hem mekanik özelliklere hem de kalıcılık özelliklerine dolaylı veya doğrudan etkisi bulunmaktadır. Hava sürükleyici ve süperakışkanlaştırıcı katkıların eşzamanlı kullanımı ile yarattıkları sinerji Şekil 2.5'te özetlenmiştir (Yalçınkaya 2009).



Şekil 2.5. Kimyasal katkıların yarattığı sinerji (Yalçınkaya 2009)

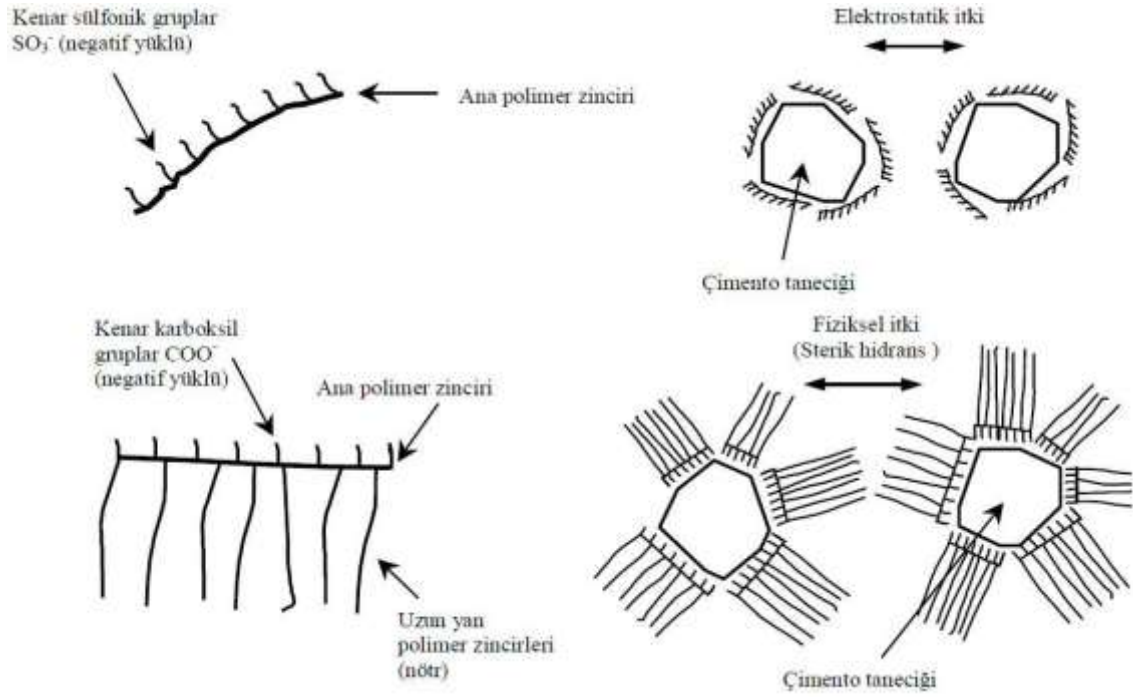
2.2.1. Süper akışkanlaştırıcı katkı

Yüksek performanslı beton üretiminde iki ana hedef mevcuttur. Bunlar betonun, düşük su/bağlayıcı oranı ve segregasyon, boşluk olmadan kolayca yerine yerleştirilebilme özelliğine sahip olmasıdır. Bu iki beklenti klasik beton teknolojisinde büyük bir çelişkidir. Ancak süperakışkanlaştırıcıların (SAK) bulunması ile bu çelişki ortadan kalkmıştır (Akman 1999).

Beton karışımlarında SAK kullanımının birçok avantajı vardır. Betonun işlenebilirliğini arttırmak ve çimento parçacıklarının dağılımını iyileştirmek, w/c oranını azaltmak, aynı zamanda beton dayanımını arttırarak, daha dayanıklı bir beton elde etmek açısından çok önemli bir katkı malzemesidir. SAK'ların kimyasal kökenlerine bağlı olarak; sülfolanmış melamin-formaldehit sıvısı (SMF), sülfolanmış naftalin-formaldehit sıvısı (SNF), modifiye edilmiş lignosülfonatlar (MLS) ile sülfonik asit esterleri ve akrilik esterler içeren diğer akışkanlaştırıcılar (PK) olmak üzere dört sınıfa ayrıldığı belirtilmektedir (Khatib ve Mangat 1999).

Yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar olarak da isimlendirilen polikarboksilik asit bazlı katkıların çalışma mekanizması, elektiriksel itkinin yanı sıra uzun yan dallar içeren polimer zincirlerinin, çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir itki

oluşturması sayesinde çimento taneciklerinin beton içerisinde dağıtılmasını sağlamak olarak açıklanabilir (Sağlam 2000, Çil 2000). Bu fiziksel etki Şekil 2.6'da görüldüğü üzere “stearik etki” olarak isimlendirilmektedir (Collepari 2005).



Şekil 2.6. Akışkanlaştırıcı katkıların stearik etkisi (Collepari 2005)

Süperakışkanlaştırıcılar kökenlerinden bağımsız olarak, moleküler ağırlık ve kimyasal içeriğindeki değişikliklere dayalı olarak çeşitlilik gösterebilir. Süperakışkanlaştırıcıların yorumlanmasındaki en büyük sorunun, katkıların kimyasal kompozisyonlarının ve moleküler ağırlıklarının tam olarak bilinmemesinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Chandra ve Björnstörn 2002).

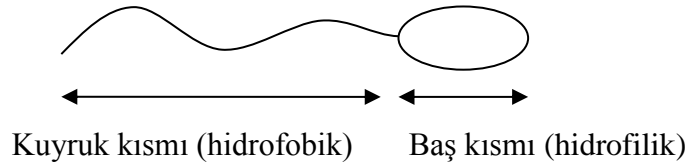
2.2.2. Hava sürükleyici katkı

Hava sürükleyici katkı maddeleri, beton yapımı esnasında taze betondaki çimento harcının içerisinde boyutları 0,05 – 1,25 mm aralığında olan, düzenli ve kalıcı hava kabarcıklarının oluşmasını sağlayan katkı maddeleridir (Erdoğan 2010).

Donma olayı sonucu beton içerisindeki suyun hacmi %9 mertebesinde artmaktadır. Henüz donmamış olan sular ise, bu genişleme sebebiyle dışarıya çıkmaya zorlanmaktadır. Hava boşlukları, dışarı çıkmaya zorlanan bu sular için bir kaçış noktası olup, emniyet

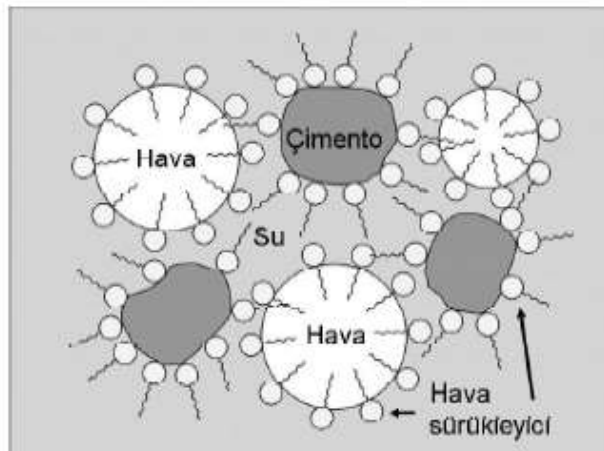
sübabı görevi görmektedir. Bu sayede donma sonucunda oluşan hidrolik basıncın etkisi azalmakta ve beton içerisindeki gerilmelerin üst seviyelere çıkması engellenmektedir. Böylece donma-çözülme olayına bağlı olarak oluşabilecek hasarlar azaltılmaktadır (Powders 1945, Powders ve Brownyard 1947, Powders ve Helmuth 1953, Erdoğan 2003).

Şekil 2.7’den de görüldüğü üzere HSK molekülleri, hidrofobik (su sevmeyen) ve hidrofilik (su seven) olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Baş kısmın (hidrofilik) elektriksel yüküne göre; negatif (-) ise anyonik, pozitif (+) ise katyonik, nötr ise non-iyonik ve hem negatif hem de pozitif yüklü ise amfoterik olarak adlandırılırlar (Myers 2006).



Şekil 2.7 HSK moleküllerin tipik kimyasal yapısı

Şekil 2.8’de hava sürükleyici katkıların çalışma mekanizması gösterilmiştir. Buna göre hava boşluğu yüzeyinde adsorbe olan HSK moleküllerinin suda kalan baş kısımları, hava boşluğu çevresinde bir koruma kalkanı oluşturur. Moleküller yüklü ise hava boşluğu da aynı yüke sahip olur ve elektrostatik itme kuvvetleri hava boşluklarını birbirinden ayırarak birleşmelerini engeller. Bu sayede hava boşluklarının stabilitesi sağlanmış olmaktadır (Dodson 1990).



Şekil 2.8. Hava sürükleyici katkıların çalışma mekanizması

Hava sürükleyici katkılar ile oluşturulan kararlı boşluklar, betonun içerisindeki hapsolmuş hava boşluklarından farklılık göstermektedir. Hapsolmuş hava boşlukları, taze betonun yerleştirilmesi sırasında istenmeden oluşan, rastgele dağılım gösteren ve bazen kendi aralarında bağlantı bulunabilen gelişigüzel şekillerdeki boşluklardır. Hava sürükleyici katkılar yardımı ile oluşturulan hava boşlukları ise daha küçük ve küresel şekilli, birbirleriyle bağlantı olmaksızın beton içerisinde düzenli bir dağılım göstermektedir (Pigeon ve Pleau 1995).

Yapılan araştırmalara göre don olayına karşı en etkili hava miktarı beton hacminin %5-7'si arasında değişmektedir. Söz konusu bu oranlardan daha az miktarlarda oluşturulan hava etkisiz kalmakta, daha yüksek orandaki hava boşlukları ise malzemenin dayanımını olumsuz etkilemektedir (Powers 1949, Pigeon ve Pleau 1995, Kosmatka ve ark. 2002). Karışımda her %1'lik hava miktarı artışının basınç dayanımını %6-10 arasında azalttığı bilinmektedir (Kosmatka ve ark. 2002). HSK kullanımında görülen başka bir sorun ise; hava kabarcıklarının, iri agregaların etrafında birleşerek zayıf bir bölge oluşumuna sebebiyet vermesidir. Agregası ile çimento hamuru arasındaki bağın zayıflamasıyla birlikte dayanımda azalmalar ortaya çıkmaktadır. Bu olay hava sürükleyici katkıların cinsi ile ilgilidir ve ağaç reçineli katkılarda görülmez. Ağaç reçinesi içermeyen katkılarda ise, betona su eklendiğinde, ve daha uzun karıştırma işlemi yapıldığında görülür (Camposagrado 2006). Donma-çözölmeye farklı şiddetlerde maruz kalan betonlarda bulunması önerilen toplam hava içeriği Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Donma-çözölmeye maruz betonlar için önerilen hava içerikleri

| Betonun toplam hava içeriği (%) | | |
|--|--|--|
| Agregası en büyük tane çapı, (mm) | Orta şiddette etki (arasıra nem etkisinde kalan ve buz çözücü tuzlara maruz kalmayan betonlar) | Şiddetli etki (sürekli nem etkisinde kalan ve buz çözücü tuzlara maruz kalan betonlar) |
| 9,5 | 6 | 7,5 |
| 12,5 | 5,5 | 7 |
| 19 | 5 | 6 |
| 25 | 5 | 6 |
| 37,5 | 4,5 | 5,5 |

Hava sürüklenme iki yöntemle yapılabilir. Bunlardan ilki hava sürükleyici bir katkı maddesinin (ağaç reçinelerinin tuzları, linyosüfonatlar, sentetik deterjanlar, petrol asitleri tuzları, proteinli malzemelerin tuzları, yağlı ve reçineli asitler ve tuzları, sülfonatlaştırılmış hidrokarbonların organik tuzları) beton karışımına katılmasıdır. Diğer yöntem ise daha az kullanılan hava sürüklenmiş çimento kullanmaktır (Sellers 2002).

Hava sürükleyici katkıların betona olumlu etkileri;

- Donma-çözülme olayları karşısında betonun dayanıklılığını artırmaktadır,
- Buz çözücü tuzlara karşı betonun dayanıklılığını artırmaktadır,
- Taze betonun işlenebilmesini artırmaktadır,
- Özellikle düşük dozlu betonlarda segregasyonu ve terlemeyi azaltmaktadır,
- Özellikle düşük dozlu betonlarda, gereken karışım suyu miktarını azaltmaktadır,
- Su/çimento oranında yapılacak azaltma nedeniyle, betonun su geçirgenliğini azaltmaktadır.

Hava sürükleyici katkı kullanımında dikkat edilmesi gerekenler ise; su/çimento oranında değişiklik yapılmadığı takdirde, basınç dayanımında bir miktar azalma olmaktadır. Hava miktarında her %1'lik artış, basınç dayanımında yaklaşık %5 kadar azalmaya yol açabilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan 2007). Bu bakımdan beton için hedeflenen dayanımda bu durum dikkate alınmalıdır.

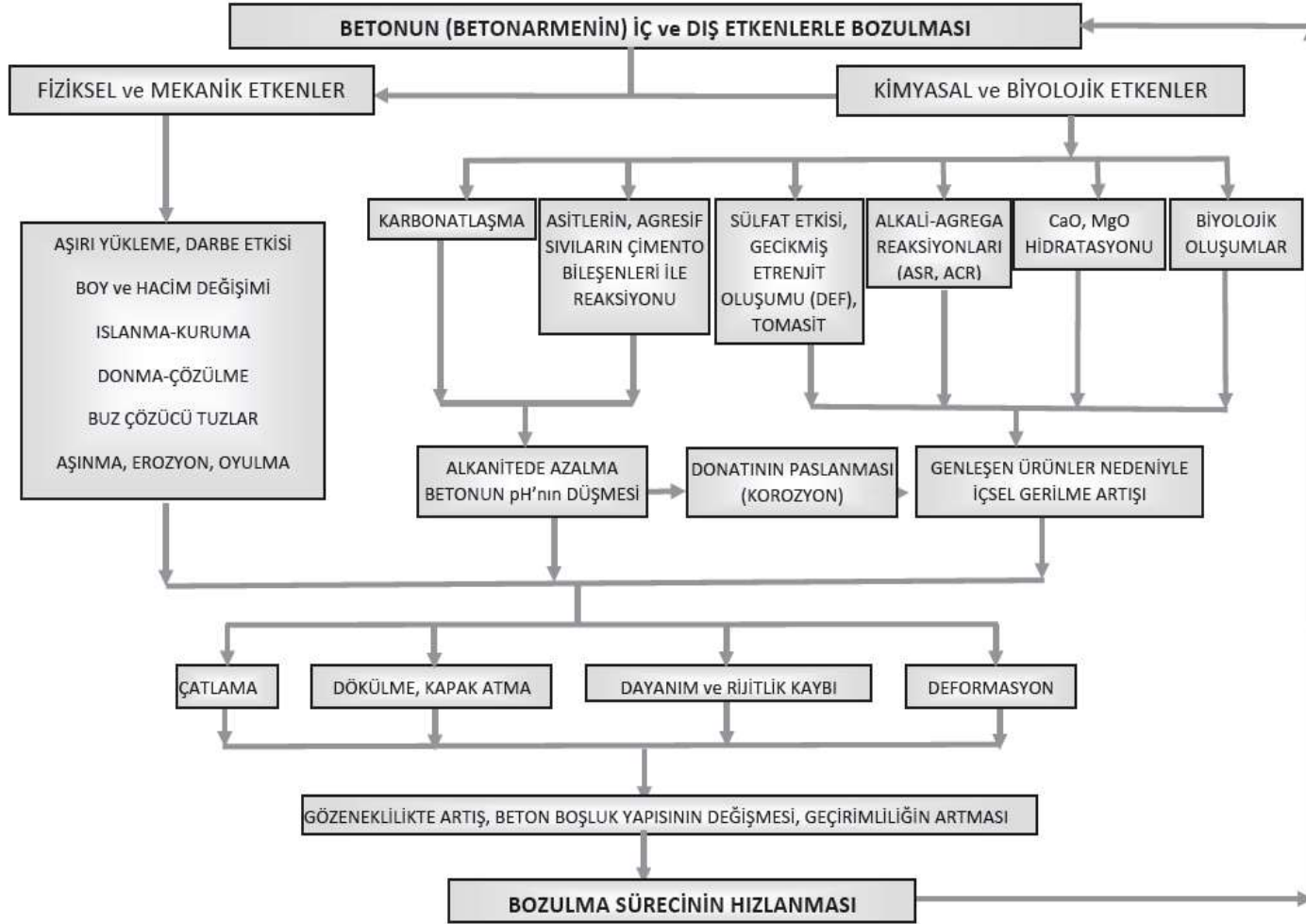
2.3. Beton Durabilitesi

Kompozit bir malzeme olan betonun, yararlı mühendislik özelliklerini sürdürebilmesinin dayanım ve dayanıklılığına bağlı olduğu bilinmektedir (Baradan ve ark. 2002). Yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamak için uygun taşıyıcı sistem seçimi, projelendirilmesi ve imâl edilmesinin yanı sıra kalıcılığını arttıracak önlemler alınmalı, yapının en az bakım gerektirecek şekilde inşası gerçekleştirilmelidir (Mather 2004).

Mehta ve Monterio (1993), malzemelerin dayanıklılık özelliklerinin de tıpkı mekanik özellikler ve maliyetler gibi, yapının tasarım aşamasında dikkate alınması gereken önemli birer unsur olduğunu vurgulamaktadırlar.

Beton, kullanılacağı yapının koşullarına göre tasarlanmış, gerekli kalite kontrol işlemlerinden geçmiş, yerleştirilmesi ve kür uygulaması standartlara göre yapılmış ise, servis ömrü boyunca kendisinden beklenen görevi yerine getirmektedir. Bu süre boyunca farklı dış ve iç etkiler sebebiyle betonun performansının düştüğü durumlar olmaktadır. Ancak kalıcı bir betonun mekanik yükler dışında bulunduğu ortamdaki kimyasal ve fiziksel etkilere karşı bozulmadan direnç göstermesi beklenmektedir. Bu etkilere örnek olarak; kıyı veya açık deniz yapılarındaki dalga hareketi, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi fiziksel nedenler, asit, klorür, sülfat etkisi, karbonatlaşma betonun içerisindeki çeliğin korozyonu ve alkali-silika reaksiyonu gibi kimyasal nedenler gösterilebilir. Alt ve üst yapılarda kullanılan beton için üretim aşamasında ve kullanımda, ortam koşullarının gerektirdiği önlemlerin alınmaması durumunda durabilite sorunuyla karşılaşılır (Mather 2004).

Durabiliteye etki eden faktörler Şekil 2.9'da tarafından özetlenmiştir (Baradan ve Aydın 2013).



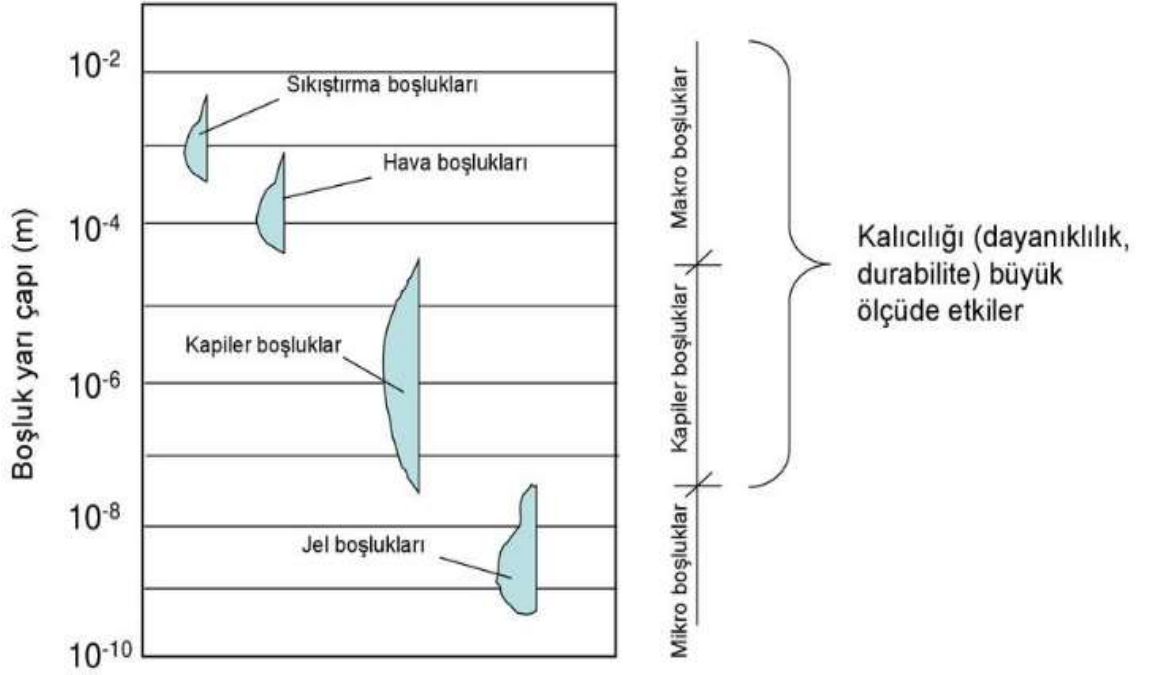
Şekil 2.9. Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması (Baradan ve Aydın 2013).

Durabiliteye etki eden en önemli faktörler betonun boşluk yapısı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan geçirimsizlik olayıdır. Durabilite ve geçirimsizlik birbiriyle yakından ilgili olan iki farklı terimdir. Betonarme yapılarda beton içerisindeki çeliği kimyasal etkilere maruz kalmadan koruyabilmek ve servis ömrü boyunca sağlıklı bir şekilde hizmet vermesini sağlamak, ancak boşluk oranı az ve buna bağlı olarak geçirimsizliği düşük olan sistemlerle mümkün olmaktadır. Günümüzde, çimentoya kıyasla daha ince olan mineral katkıların çeşitli kimyasal katkıları ile birlikte kullanılmasıyla daha dayanıklı betonların üretilmesi mümkündür. Ultra incelikteki malzemelerin kullanımıyla ortaya çıkan su ihtiyacı problemi süper ve hiper akışkanlaştırıcı olarak bilinen yeni nesil akışkanlaştırıcıların kullanımıyla ortadan kalkmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip dayanıklı betonların üretiminde kür koşullarına da titizlikle uyulması gerekmektedir (Mather 2004, Taşdemir 2003)

Günümüzde yapısal tasarımda malzeme dayanımları kadar dayanıklılık ölçütlerinin de dikkate alınması gerektiği fikri kabul görmektedir (Sommerville 2000).

2.4. Betonun Boşluk Yapısı

Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel etkilerin hemen hepsinde iki ana faktör vardır. Bunlar ortamda olan su varlığı ve beton bünyesindeki boşluklar ve suyun çatlaklar ile taşınımıdır. Bu taşınımın hızı ve etkisi beton içindeki boşluk ve çatlakların büyüklüğüne, dağılımına ve birbiri ile bağlantılı olup olmamasına bağlıdır. Zararlı maddelerin, suyun ve gazların beton içine taşınımı ve bunların beton ile etkileşimi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir. Taşınım boyutu, hızı ve etkisi büyük ölçüde beton bünyesindeki boşluk ve çatlakların çapı ve dağılımına ayrıca beton bünyesindeki mikro iklimine bağlıdır. Bu nedenle beton bünyesini ve boşluk yapısını iyi tanımak gerekir. Beton içindeki boşluklar çimento hamurunda ve agregada olmak üzere ikiye ayrılır. Bu boşluklar normal beton hacminin %10'una kadar çıkabildiği gibi, %1'in altına da düşebilir. Doğaldır ki %10 civarında boşluk içeren bir beton, bal peteği görünümünde, çok düşük dayanımlı ve kalıcı olmayan bir betondur. Boşluk oranını kontrol etmek, en düşük değere indirebilmek, beton teknolojisinin kurallarına uymakla olanaklıdır (Baradan ve ark. 2002). Şekil 2.10'da çimento hamurunda bulunan boşluklar gösterilmiştir (<https://slideplayer.biz.tr/slide/15778384/>, 2019).



Şekil 2.10. Çimento hamurunda bulunan boşluklar

Betonun geçirimsizlik özelliklerini ve su emme özelliklerini doğrudan ilgilendiren bu boşluklar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Jel Boşlukları: Hidratasyon olayı sırasında oluşan CSH (karbon-silika-hidrat) jellerinin yapısında çok küçük boyutlu boşluklar yer almakta ve bu boşluklar jel yapısının yaklaşık olarak %28'ini oluşturmaktadır (Powers ve Helmuth 1953). Birbiriyle bağlantısı olan bu boşlukların çapı 15-20 angstrom (1 angstrom= 10^{-7} mm). civarındadır (Erdoğan 2010). Jel boşluklarında bulunan suyun çok düşük sıcaklıklarda donduğu bilinmektedir. Bu konu hakkında yapılan bir çalışmada, boşluklardaki suyun -78 °C'de donduğu tespit edilmiştir (Cordon 1966). 0 °C'de jel boşluklarındaki su ile kapiler boşluklardaki su denge halinde olacak ve normal sıcaklıklarda jel boşluklarındaki su her zaman sıvı kalacaktır (Savaş 1999). Betonun geçirimsizliği ve durabilitesine çok fazla etkisi olmayan bu boşluklar, hacimsel olarak beton içerisinde artış gösterirse beton için tehlikeli durumlar ortaya çıkabilir (Saran 2007).

Kapiler boşluklar: Çimento hidratasyonu sonucunda oluşan CSH jel parçacıkları arasında yer alan su nedeniyle oluşmaktadır. Farklı şekil ve boyutlarda bulunan bu boşlukların ortalama çapı $0,0005$ mm'dir. Başlangıçta çimento hamuru içerisinde rastgele dağılım

gösteren ve içi su dolu olan bu boşluklar, çimento hamuru karılırken birbiriyle genellikle bağlantılı durumdadır. Ancak, hidratasyonun devam etmesi ve daha çok jel üretilmesiyle, bu boşlukların arasındaki bağlantı azalmaktadır (Neville ve Brooks 1987, Erdoğan 2003). Beton içerisinde kalan bu boşluklar betonun dayanımını etkilemesinin yanında beton içerisinde suyun ilerlemesine de yol açarlar. Bu tip boşluklar beton içerisinde fazla olduğunda beton içerisindeki su taşınım için kolayca yol bulabilmektedir. Kapiler boşluklardaki su ile donma-çözülme etkileri, bu boşluklara dışardan sızan suyun içerisindeki sülfat ve asit gibi beton içerisinde yabancı maddelerin oluşturacağı kimyasal tepkimeler sonucunda betonda genişleme ve çatlamların oluşumuna yol açmaktadır. Kapiler boşluklarda yer alan suyun kuruma veya ıslanma koşullarına göre hareketliliği bulunmaktadır. Beton kuruduğu takdirde kapiler boşluklarda bulunan su buharlaşır. Beton ıslandığı zaman ise su bu boşluklarda tekrar yerini almaktadır. Soğuk havalarda bu boşluklardaki suyun bir kısmı veya tamamı donabilmektedir. Bu boşlukların fazla olması beton dayanımını düşürmekle beraber, su geçirgenliğini artırmakta, betonun donma-çözülme dayanıklılığını düşürmektedir (Tola 2000).

Sürüklenmiş Hava Kabarcıkları: Bu boşluklar betonda hava sürükleyici katkı maddeleri kullanarak oluşturulan boşluklardır. Hacimleri toplam beton hacminin %4 ile %8'i arasında değişebilmektedir. Şekilleri küresel olup büyüklükleri 0.05 mm ile 1.25 mm arasında değişebilmektedir. Boşlukların kendi aralarında bağlantı yoktur. Beton üretiminde bilerek oluşturulan bu boşlukların, betonun donma-çözülme etkisine karşı direncini arttırmak, işlenebilmeyi kolaylaştırmak, terlemeyi azaltmak gibi olumlu katkıları vardır (Saran 2007).

Hapsolmuş Hava Boşlukları: Taze betonun karılması ve yerleştirilmesi sırasında beton içerisine hapsolmuş olan hava boşluklarıdır. Bu tür boşlukların bir kısmı yerleştirme ve sıkıştırma işlemi esnasında kaybolursa bile nihai durumda beton içerisinde bir miktar kalabilmektedir. Beton içerisindeki bu boşlukların hacmi normal sıkıştırma işlemine maruz kalan betonlarda %0,5 ila %3 mertebesinde değişebilmektedir (Saran 2007).

Beton içerisinde bu boşluklara ek olarak terleme ve çimento hamurunun büzülmesi ile oluşmuş boşluklar da bulunabilmektedir (Saran 2007).

Bunların dışında; taze betondaki terleme nedeniyle betondaki suyun yüzeye çıkma eğilimi sonucunda, sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan boşluklar; ayrıca, üst kısımlara hareket eden suyun iri agrega tanelerinin ve betonarme demirlerinin altında birikmesi nedeniyle yer alan boşluklar, Çimento hamurunun kuruyarak büzülmesi nedeniyle, çimento hamuru ile agrega taneleri arasında oluşabilecek boşluklar, agrega tanelerinin yapısında bulunabilecek boşluklar da mevcuttur (Erdoğan 2010).

Agrega taneleri, genellikle boşluk içermediğinden betonun geçirimliliği çimento hamurunun geçirimliliğine ve agrega-çimento hamuru arasındaki aderansa bağlıdır. Geçirimsizlik açısından bakıldığında aynı su/çimento oranında beton harçtan, harç da hamurdan daha geçirimlidir. Betonda dayanıklılık açısından en zayıf halka agrega-çimento hamuru arayüzeyi ve onun boşluklu yapısıdır (Baradan ve ark. 2012).

Bazı araştırmacılara göre DÇ dayanıklılığını etkileyen faktörler arasında, potansiyel donabilen su, boşluklardaki serbest su miktarı, agrega su muhtevası, sınır tabakasında bulunan su, çatlaklardaki su ve bunların kendi davranışları vardır (Gao ve ark. 2002).

Betonun bozulmasına; donatı korozyonu, donma-çözülme, alkali-silika reaksiyonu ve sülfat atakları gibi oldukça farklı etkiler bulunmaktadır. Ancak bu tahrip edici reaksiyonların her birinde genleşme veya kimyasal reaksiyonların mekanizmalarında su etkin rol oynar. Aynı zamanda su, klor iyonları, sülfat gibi bozucu agresif maddelerin taşınmasında temel vasıta. Mekanik yüklemelerden ve çevresel ataklardan dolayı servis ömrü süresince betonda çatlaklar oluşmaktadır. Su ve çatlakların karşılıklı etkileşimi ile bozulma süreci hızlanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak betonun içerisinde suyun taşınması betonun durabilitesi üzerinde anahtar bir rol oynar (Aquino 2002, Yang 2004). Günümüzde beton teknolojisinin gelişmesi ile kullanılan kimyasal ve mineral katkıları ile bu boşlukların oranı düşürülebilmekte ve daha dayanıklı betonlar üretilmektedir (Saran 2007).

2.5. Betonda Donma-Çözülme Olayı

TS 1248 Standardı'na göre birbirini takip eden üç günde, günlük ortalama hava sıcaklığının +5 °C'nin altında ölçülmesi ve bu süreçte hiç bir yarım gün sıcaklığın +10

°C'nin üstünde olmaması durumu "beton için soğuk hava" olarak adlandırılır. Soğuk hava koşullarında, sertleşmiş ve suya doygun haldeki betonlarda donma-çözülme (DÇ) olayı sebebiyle çimento harcında bulunan kapiler boşluklardaki sular donarak genişlemektedir. Tekrarlanan donma-çözülme etkisi ile birlikte bu genişleme miktarı kümülatif olarak artmaktadır. Bu sebeple sık tekrarlanan donma-çözülme olaylarının etkisi, çözülmenin görülmediği uzun süreli don etkisine göre çok daha fazla olmaktadır. Donma olayı sonucunda oluşmuş ince bir çatlağın yeniden donma esnasında genişleyip büyümesiyle bu durumu açıklamak mümkündür. Genleşme olayı ile birlikte oluşan gerilmelerin betonun çekme dayanımından yüksek olması durumunda betonda kabuk atma, çatlama, ufalanma şeklinde bozulmalar görülmektedir (Baradan ve ark. 2002).

Kapiler boşluklardaki suyun donması sonucu oluşan buz kütesinin hacminin, betondaki mevcut boşluk hacminden büyük olması durumunda, genleşme basıncından dolayı beton içerisinde bulunan serbest sular dışarıya çıkmaya zorlanmaktadır. Oluşan hidrolik basıncın büyüklüğü; çimento hamurunun geçirgenliği, donma derecesi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Oluşan basıncın betonun çekme dayanımından yüksek olduğu durumlarda lokal çatlaklar meydana gelmektedir. Çatlaklara sızan suların tekrar eden DÇ olayı ile birlikte donarak genişmesi sonucu, çatlaklar iyice genişlemekte ve betonun bozulma miktarı artmaktadır (Detwiler ve ark. 1989).

Betonun donması, ısı transferinin hızı ve donma noktasındaki boşluğun boyutuna bağlı olarak kademeli bir şekilde gerçekleşmektedir. Donma, büyük boşluklarda bulunan sudan başlayarak küçük boşluklara doğru yayılmaktadır. Oluşan hasar, yüzeydeki dökülmelerden başlayarak tabakalar halinde parçalanma ile betonun içine doğru ilerlemektedir (Neville 1995).

Betonun tekrarlı donma-çözülme etkisinde kalması fiziksel etkilerden bir tanesidir. Karasal iklimin hakim olduğu yörelerde binaların dış cepheleri, köprülerin kolon ve kirişleri, barajlar, istinat duvarları, beton yol döşemeleri ve hava meydanı pistleri gibi yüzeyleri atmosfer etkilerine açık kalacak betonarme elemanlarda beton kalıcılığının karşısındaki en büyük tehditlerden birisi donma-çözülme olayıdır (Shang ve Song 2008).

Dünyanın birçok bölgesinde, tekrar eden DÇ döngülerinin yol açtığı hasarlar iyi bilinmektedir. Donma-çözülme olayında betona zarar veren ve esas role sahip olan sudur. Su başlangıçta karışımında bulunabilir veya sonradan betona girmiş olabilir. Taze betonda veya erken yaştaki betonda meydana gelen DÇ olayının olumsuz etkisi betona genellikle onarılması imkânsız zararlar verir (Neville 2001).

Donma-çözülme olayını taze betonda ve sertleşmiş betonda olmak üzere iki kısımda incelemek gerekir. Henüz priz almamış ve don olayı etkisinde kalan betonda, karışım suyu betondaki hacim artışına bağlı olarak donar. Bu durumda mevcut su kimyasal tepkimelerde kullanılamayacağından betonun prizi ve sertleşmesi gecikir. Soğuk hava koşullarının sürekliliği durumunda ise priz olayı gerçekleşmemektedir. İlerleyen zamanlarda çözülmenin meydana gelmesi durumunda, dayanım kaybı yaşanmadan priz ve sertleşmenin sağlanabilmesi için betonun tekrar karıştırılması gerekir. (Neville 1995).

Erken yaşlardaki betonun DÇ'den etkilenip etkilenmemesi ile ilgili kritik yaş ve kritik dayanım kavramları ortaya konulmuştur. Kritik yaş kavramı, en genel ifade ile beton başlangıçta donarsa hasara uğramaması için sahip olması gereken yaşı ifade eder. Genellikle 8-48 saat arasında değişen kritik yaş, bazen daha uzun sürebilir. Buna kütle betonlarının ısı çatlaklardan korunması için daha uzun süre korunması örnek olarak verilebilir (Detwiler ve ark. 1989). Betonun bir kez donma-çözülme olayı karşısında hasar görmemesi için ulaşması gereken kritik dayanım değeri ise en az 3,5 MPa seviyesinde olmalıdır (ACI 306R-88, 1994).

Betonda DÇ hasarına sebep en önemli etkenler; kapiler boşluklarda meydana gelen donma nedeniyle hidrolik basıncın yayılması, donma başladıktan sonra jel suyunun kapiler boşluklara doğru hareketi, ısı etki gibi lokal genleşmelerin neden olduğu farklı şekil değiştirmeler ve çözeltilerin kapiler boşluklardaki kısmi donmasından kaynaklanan osmotik basınçtır (Basheer ve ark. 2001, Şahin 2003).

Jel boşluklarının küçük çaplı yapılarından dolayı içerilerinde buz oluşumu genellikle mümkün olmamakla birlikte, jel suyu ve buz arasındaki entropi farkından dolayı kılcal boşluklara taşınan jel suyu, bu boşluklarda donabilmektedir. Dolayısıyla, buz kütlesi

artmakta ve fazladan bir genişleme meydana gelmektedir. Buz basıncının artmasına sebep olan iki etken vardır:

1-) Beton ve çimento hamuru içerisindeki kapiler boşluklarda bulunan su düşük sıcaklıklarda %9 oranında genişleyerek buz kütesine dönüşmektedir. Böylece donan suyun oluşturduğu buz kütesi, henüz donmamış olan suları itererek dışarı çıkmaya zorlamaktadır. Bu itiş hızı, donmanın ilerleme hızına bağlıdır. Hidrolik basınç, itilen suyun o esnada karşılaştığı direnç miktarıyla doğru orantılıdır. Geçirgenliği az olan çimento hamurlarında, fazla suyun boşluklar arasındaki hareketi esnasında karşılaşılabilecek direnç artmakta ve buna bağlı olarak yüksek basınç oluşmaktadır (Neville 1995).

2-) Bazı araştırmalar, su yayılımının buz kütlelerini büyütmesinin betonda don hasarı oluşmasında en önemli sebep olduğunu göstermektedir. Su yayılımının nedeni osmotik basınçtır. Bu basınç ise donmuş saf su ile henüz donmamış çözelti arasındaki konsantrasyon farkından dolayı ortaya çıkmaktadır (Neville 1995).

Betonun DÇ etkisine gösterdiği direnç, geçirimsizliğine ve boşluk yapısına bağlıdır. Betonda donma-çözülme olayına bağlı hasarlara karşı alınabilecek başlıca önlemler; düşük s/ç oranının sağlanması, uygun kür tekniklerinin kullanılması, iyi sıkıştırma yapılması ve hava sürükleyici katkıların kullanılmasıdır. Betondaki sürüklenmiş hava boşluklarının donma-çözülme durabilitesini iyileştirdiği 1940'lı yıllardan beri bilinmektedir (Snyder 1998).

Betonun don dayanıklılığı için ihtiyaç duyulan hava miktarı harç hacminin %9'u kadardır. Katkısız betonda bu havanın homojen dağılması zordur. Hava sürükleyici katkıların betonun içerisindeki havanın homojen dağılmasını sağlar. Birbirinden bağımsız olarak homojen bir biçimde dağılan hava, içerisine giren su donduğunda içsel gerilmeler oluşturamaz. Böylece donma-çözülme etkisine maruz beton daha az zarar görür. Ayrıca betonun işlenebilirliği ve donma-çözülme direnci artar, ayrışması ve su ihtiyacı azalır. Ancak hava miktarı %1-8 olan betonlarda, hava miktarındaki her %1'lik artış basınç dayanımını %5 oranında azaltmaktadır (Powers 1949, Pigeon ve Pleau 1995, Neville 1997, Erdoğan 2003, Yalçınkaya 2009).

Hava katkısının etkinliği betonun s/ oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Bu sebeple HSK maddesi kullanımının yanı sıra, betonda kapiler boşlukları en alt düzeye çekecek önlemlerde alınmalıdır. ACI-201R'de donma-zlme ile karşılaşacak betonlarda, s/ oranının 0,5'i aşmaması ve beton basıncı dayanımının 24 MPa'ya ulaşana kadar donma-zlmeye maruz kalmaması önerilmektedir (Baradan ve ark. 2002). Donma-zlme olayına maruz kalarak hasar gören yapılara Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 rnek verilebilir (Baradan ve ark. 2002).



Şekil 2.11. Donma-zlme çevrimi sonrası hasar gören Denizli ili - Işıklı ilçesi betonarme döşeme (Baradan ve ark. 2002)



Şekil 2.12. Donma-zlme çevrimi sonrası hasar gören Uşak ili – Eşme ilçesi betonarme temel (Baradan ve ark. 2002)

Donma-çözülme dayanıklılığını etkileyen faktörler Yalçınkaya (2009) tarafından Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Donma-çözülme dayanıklılığını etkileyen faktörler (Yalçınkaya 2009)

| İçsel Faktörler | Dış Faktörler |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| S/Ç oranı (majör etki) | Doygunluk Derecesi (majör etki) |
| Sürüklenmiş Hava Miktarı (majör etki) | Donma Hızı |
| Agrega | Minimum Sıcaklık |
| Çimento Türü | Donmada Bekleme Süresi |
| Akışkanlaştırıcı Katkılar | Kür Sıcaklığı |
| Alkaliler | Örtücüler (sealants) |
| Viskozite Artırıcı Kimyasallar | Uygulanan Yük |
| Lateks Katkısı | |
| Lif Katkıları | |

2.6. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Tez çalışmasına ışık tutması amacıyla yapılan literatür araştırması iki kısımda verilmiştir. Birinci kısımda, beton üretiminde sıkça kullanılan mineral katkıları hakkında yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere yer verilmiştir. İkinci kısımda ise, mineral katkı ve hava sürükleyici katkı kullanımının donma-çözülme olayına etkisinin incelendiği çalışmalar ele alınmıştır. Konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Farklı oranlarda silis dumanının CEM II/A-M 32.5 çimento ile ikame edilmesinin beton karışımlarının mekanik davranışlarına etkisi Topçu ve ark. tarafından incelenmiştir. Bu amaçla ağırlıkça, %5, %10 ve %15 oranlarında çimento silis dumanı ile yer değiştirmiştir. Sonuçlara göre, silis dumanı ikame oranı artışı ile beton karışımlarının mekanik özellikleri olumlu etkilenmiştir. Ancak belirli bir işlenebilirliği sağlamak için katkı gereksinimi artmıştır. Yazarlar, silis dumanı kullanımı ile mekanik özelliklerin olumlu etkilenmesini, kalsiyum hidroksitlerin (CH) kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüşmesi, gözeneklerin azalmasıyla daha boşluksuz bir yapı elde edilmesi ve daha güçlü bir agrega hamur ara yüzeyi oluşumu sebebiyle açıklamışlardır (Topçu ve ark. 2008).

Aitcin ve Laplante tarafından yapılan bir çalışmada %5 ve daha az silis dumanı ilavesinin beton karışımlarının su ihtiyacına bir etkisi olmadığı, ancak bu oranın üstünde silis

dumanı kullanımıyla beton karışımlarının su ihtiyacının arttığı bildirilmiştir (Aïtcin ve Laplante 1990).

Diğer bir çalışmada, porozimetre cihazı ile yapılan deneyler sonucu silis dumanının çimento hamuru ve harç karışımlarında iri gözenekleri azaltarak, homojen bir şekilde dağılım gösteren daha fazla sayıda küçük gözenek oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu durum içyapıda bulunan toplam gözenekliliği etkilememiştir. Homojen dağılım gösteren küçük gözeneklerden suyun daha yavaş ve kontrollü olarak buharlaştığı belirtilmiştir. Bu nedenle silis dumanı içermeyen kontrol karışımına kıyasla silis dumanı içeren karışımların geçirgenliği daha az olmuştur (Yeğınobalı 2009).

Benzer bir diğer çalışmada, mineral katkı kullanımının yüksek dayanımlı beton karışımlarının performansına etkisi Hassan ve ark. (2000) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla ağırlıkça %10 ve %30 oranında SD ve UK, Portland çimentosu ile yer değiştirerek üç farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Üretilen beton karışımlarının erken yaş ve ileri yaş basınç dayanımı, boşluk yapısı, oksijen geçirgenliği ve klor iyon geçirgenliği incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; mineral katkı kullanımı yüksek dayanımlı beton karışımlarının genel olarak söz konusu özelliklerini iyileştirmiştir. Ancak, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te görüldüğü üzere silis dumanı bu bağlamda uçucu küle göre daha başarılı olmuştur. Silis dumanı hem erken yaş hem ileri yaş özellikleri iyileştirirken uçucu külün etkisi ileri yaşlarda ortaya çıkmıştır.

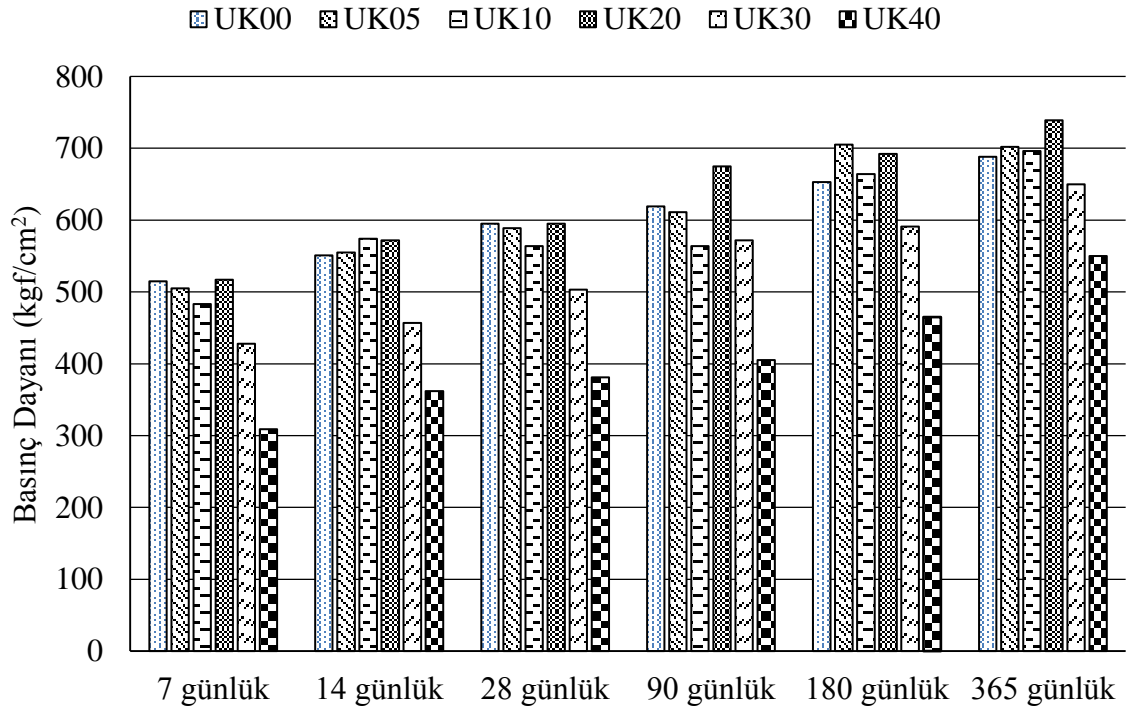
Çizelge 2.4. Çalışmada üretilen karışımların basınç dayanım oranları (Hassan ve ark. 2000)

| Yaş (gün) | K | UK | SD |
|-----------|---|------|------|
| 1 | 1 | 0,74 | 1,11 |
| 3 | 1 | 0,89 | 1,09 |
| 7 | 1 | 0,89 | 1,04 |
| 28 | 1 | 1,00 | 1,09 |
| 365 | 1 | 1,07 | 1,09 |

Çizelge 2.5. Çalışmada üretilen karışımların permeabilite oranları (Hassan ve ark. 2000)

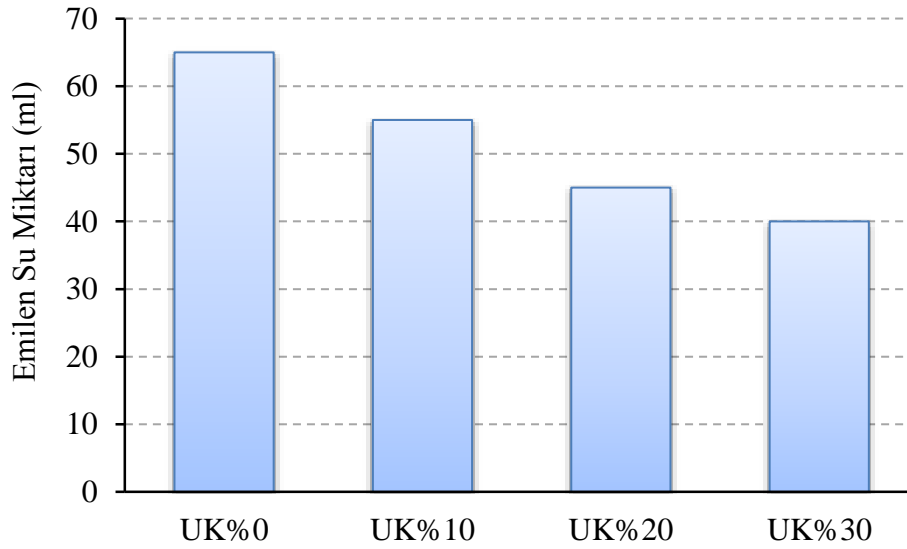
| Yaş | K | UK | SD |
|-----|---|------|------|
| 1 | 1 | 0,60 | 0,29 |
| 3 | 1 | 0,57 | 0,22 |
| 7 | 1 | 0,53 | 0,18 |
| 28 | 1 | 0,30 | 0,14 |
| 365 | 1 | 0,16 | 0,13 |

Diğer bir çalışmada, uçucu külün farklı oranlarda çimento yerine kullanılmasının beton karışımlarının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çimento ağırlığının %0 ile %40'ı kadar beş farklı oranda uçucu kül ikame edilmiştir. Deney sonuçlarına göre uçucu külün %30 oranında çimento yerine kullanılması beton karışımlarının mekanik özelliklerini olumlu etkilemiştir. En başarılı sonucun %20 oranında uçucu kül ikamesi ile sağlandığı gözlemlenmiştir. Elde edilen küp beton basınç dayanım değerleri Şekil 2.13'te gösterilmiştir. (Dinçer ve Çağatay 2004).



Şekil 2.13. Çimento yerine %5, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında uçucu kül ikamesi ile hazırlanan karışımların, 15x15 küp beton dayanım değerleri (Dinçer ve Çağatay 2004)

Başka bir çalışmada, uçucu külün %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine kullanılmasının beton karışımlarının 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve 60 günlük permeabilite özellikleri üzerine etkisi Güçlüer ve Ünal tarafından incelenmiştir. Tüm beton karışımlarında su/çimento oranı (s/ç) ve çimento dozajı sırası ile, 0,5 ve 300 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre %20 oranına kadar uçucu külün kullanımıyla beton karışımlarının söz konusu özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu oranın üstünde uçucu külün ikamesiyle ultrases geçiş hızı ve geçirgenlik özellikleri olumlu etkilenirken, basınç dayanımları azalmıştır. Söz konusu basınç dayanımlarındaki azalmalar, 56 günlük örneklerde de gözlemlenmiştir. 60 günlük numunelerin su emme değerleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir (Güçlüer ve Ünal 2010). Benzer sonuçlar Delikurt ve Sevim (2015) tarafından da elde edilmiştir.



Şekil 2.14. 60 günlük numunelerin su emme değerleri (Güçlüer ve Ünal 2010)

Diğer bir çalışmada, uçucu kül, silis dumanı ve metakaolinin çimento yerine kullanımının, harç karışımlarının basınç dayanımı, dinamik elastisite modülü, klor iyon geçirgenliği, su emme, kılcal su emme, donma-çözülme ve sülfat direncine etkisi kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Ayrıca seçilen bazı karışımlar üzerinde mikroyapı analizleri de gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten sülfat direnci deney sonuçları üzerinde regrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Yazarlar harç karışımlarında farklı türlerde mineral katkının bulunmasının etrenjit morfolojisini değiştirdiğini ifade etmişlerdir. SD ve MK içeren karışımlarda sırasıyla top tipi etrenjit ve özel bir tip etrenjit olduğu

gözlemlenmiştir. UK içeren karışımlarda iğne tipi ve top tipi etrenjit oluşmuştur. Kontrol karışımında ise iğne tipi, top tipi ve masif tipi etrenjit olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre karışımlar performans açısından sırasıyla silis dumanlı, metakaolinli, uçucu küllü ve kontrol karışımı olarak sıralanmıştır (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2014).

Pandey ve Sharma, uçucu kül ikameli harç karışımlarının 7 ve 28 günlük boşluk dağılımlarının uçucu kül içermeyen kontrol harca göre daha fazla olduğunu, ancak 90 ve daha sonraki günlerde puzolanik reaksiyonların artmasıyla birlikte gözeneklerin azaldığını ifade etmişlerdir (Pandey ve Sharma 2000).

Başka bir çalışmada farklı mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının zamana bağlı reolojik özellikleri değişimi Reza Saleh ve ark. tarafından yapılmıştır. Bu amaçla, farklı oranlarda SD, MK, F tipi UK, C tipi UK ve YFC ikili ve üçlü çimentolu sistemler olarak kullanılarak toplamda 17 KYB (kendiliğinden yerleşen beton) karışımı hazırlanmıştır. Tüm KYB karışımlarında, çökme yayılma değeri sabit tutulmuştur. Üretilen KYB karışımlarının, T_{50} akış süresi, plastik viskozite, görünür eşik kayma gerilmesi ve tiksotropik özellikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, diğer karışımlara kıyasla F tipi ve C tipi UK ve YFC içeren karışımlar, ayrışma ve kusmaya daha meyilli olmuştur. Karışımların eşik kayma gerilmesi ve tiksotropisi zamanla ciddi mertebede artış göstermiştir. Ancak, zamana bağlı plastik viskozite değerleri çok fazla değişmemiştir. MK ve C tipi UK, eşik kayma gerilme değerini ve plastik viskozitenin zamanla değişimini, diğer mineral katkılara kıyasla daha fazla etkilemiştir (Reza Saleh ve ark. 2015).

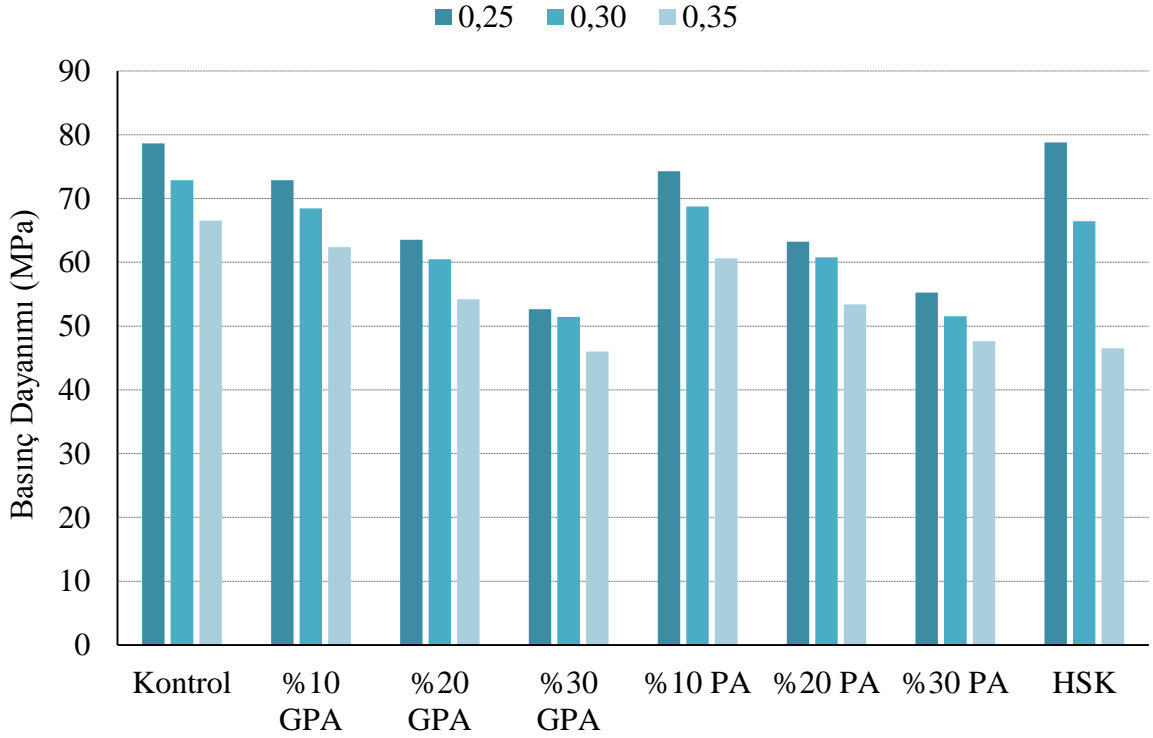
Diğer bir çalışmada, magnezyum sülfat konsantrasyonunun, uçucu kül ve silis dumanı içeren hafif harçların mikroyapı ve dayanım özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, çimento ağırlığının %15'i UK ve %10'u SD içeren karışımlar hazırlanmıştır. Numuneler 28 günlük kür sürelerinin ardından, bir yıl boyunca farklı sülfat konsantrasyonlarına maruz bırakılmıştır. Gerçekleştirilen mikroyapı analizleri sonucunda, magnezyum sülfata maruz kalan hafif harçların bozunma mekanizmasının, magnezyum sülfat konsantrasyon yüzdesine ve mineral katkı türüne göre değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca SD içeren karışımların basınç dayanımı, kontrol ve UK karışımına kıyasla daha yüksek olmuştur (Tanyıldızı 2012).

Literatürden anlaşıldığı gibi silis dumanı ve uçucu kül kullanımıyla ilgili bir çok farklı araştırma yapılmıştır. Gerçekleştirilen araştırmalarda mineral katkıları ikili bağlayıcı sistemler olarak çimento esaslı karışımlarda kullanılmıştır. Ancak, bu çalışmada uçucu kül ve silis dumanının ikili bağlayıcı sistemler olarak kullanılmasına ilaveten üçlü bağlayıcı sistemler olarak kullanılmasının harç karışımlarının özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, farklı kombinasyonlarda mineral katkıları karışımlar hazırlanarak, mineral katkı içermeyen kontrol karışımına göre performansları kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Hem taze hal hem de sertleşmiş hal özellikleri açısından istenilen davranışı sergileyen karışımların belirlenmesi hedeflenmiştir.

Beton durabilitesine büyük ölçüde etki eden donma-çözülme olayı giriş bölümünde anlatılmıştır. Betonun DÇ etkisine gösterdiği direnç, geçirimsizliğine ve boşluk yapısına bağlıdır. Betonda donma-çözülme olayına bağlı hasarlara karşı alınabilecek başlıca önlemler; düşük s/ç oranının sağlanması, uygun kür tekniklerinin kullanılması, iyi sıkıştırma yapılması, çeşitli mineral ve hava sürükleyici katkıların kullanılmasıdır. Mineral katkı kullanımının betonda donma-çözülme direnci üzerine etkisi, kullanılan malzeme özellikleri, su/bağlayıcı oranı, hava sürüklenme miktarı ve uygulanan deney yöntemleri gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Yeğin (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, hafif agregalar kullanılan betonların donma-çözülme hasarına karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Çalışmada, hafif agregalar olarak ince agregalar yerine tüm agregalar hacminin %10, 20 ve 30' u kadar genişletilmiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA) kullanılarak 3 farklı s/b oranına sahip (0,25, 0,30 ve 0,35) karışımlar hazırlanmıştır. Tüm karışımlara mineral katkı olarak bağlayıcı ağırlığının %7' si kadar silis dumanı katılmıştır. Ayrıca bir grupta %0,01 oranında HSK kullanılmıştır. Üretilen karışımlar ve kontrol karışımı üzerinde ASTM C666 standart' ında belirtilen yöntem A ve yöntem B için 200 donma-çözülme çevrimi yapılmıştır. Donma-çözülme hasarının belirlenmesi için, numunelerin basınç dayanımları, ultrason hızları ve birim ağırlık değişimleri de incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, hafif agregalar ve HSK kullanımının donma-çözülme direncine etkisi iki ayrı yöntemle göre belirlenip kıyaslamalar yapılmıştır. Donma-çözülme hasarına karşı en olumlu sonuç, %10 oranında

hafif agrega ve HSK içeren karışımlarda görülmüştür. Donma-çözülme yöntemleri karşılaştırıldığında ise; yöntem A'nın yöntem B'ye göre daha fazla hasara sebep olduğu gözlemlenmiştir. 28 günlük numunelerin basınç dayanım değerleri Şekil 2.15'te gösterilmiştir



Şekil 2.15. 28 günlük numunelerin basınç dayanım değerleri, MPa (Yeğin 2009)

Ataş (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, üç farklı türde HSK'nın, dört farklı oranda (%0,00, 0,45, 0,55 ve 0,65) çimento harcında kullanılmasıyla hazırlanan numuneler, donma-çözülme döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra eğilme, basınç ve ultrasonik ses deneylerine tabi tutulmuştur. Bunlara ilave olarak kütle özellikleri de belirlenmiştir. Karışımların s/ç oranı 0,45 olarak sabit tutulmuştur. Kontrol karışımı ile yapılan kıyaslamalar sonucu HSK'nın betonun donma-çözülme direncini artırırken mekanik özelliklerini de düşürebildiği gözlemlenmiştir. Çalışmada en iyi performansı %65 oranında kullanılan HSK3 katkısı göstermiştir. Kullanılan katkıların teknik özellikleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Kullanılan hava sürükleyici katkılara ait teknik bilgiler (Ataş 2013)

| Özellikler | Kimyasal Yapı | Yoğunluk (kg/l) | Klor İçeriği % (EN 480-10) | Alkali Miktarı % (EN 480-12) |
|------------|--|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| HSK1 | Yağ alkolü ve Amonyum tuzu esaslı | 0,98-1,02 | 0,1 | <10 |
| HSK2 | Özel yüzey aktif maddelerden oluşan sıvı | 0,99-1,03 | En fazla %0,1 | En fazla %3 |
| HSK3 | Özel inorganik maddeler karışımı toz | 0,95±0,05 | - | - |

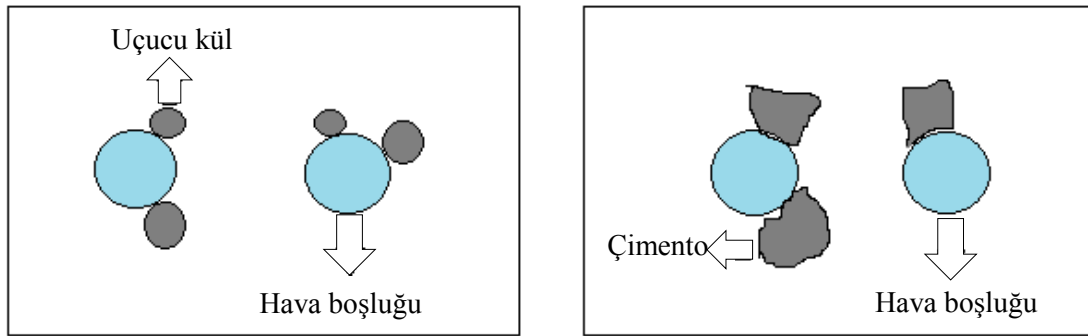
Numuneler 40 günlük kür sürelerinin sonunda 5 farklı donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Her serinin 0, 7, 14, 28 ve 56 çevrim sonunda basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Numunelerin 56 çevrimi tamamlamaları yaklaşık olarak 16 gün sürmüştür. Deney sonucunda tespit edilen basınç dayanım değerleri Çizelge 2.7’de verilmiştir. Beklenildiği üzere çevrim sayısının artmasıyla birlikte, basınç dayanımı değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Donma-çözülme çevrimleri başlamadan önce yapılan dayanım testinde HSK1 ve HSK2 serilerinin, kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımını %50’ den fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. Basınç dayanımındaki bu düşüş donma-çözülme döngüsünden sonra da görülmektedir. Diğer bir yandan, %0,65 oranında HSK3 katkısı ile hazırlanan karışım donma-çözülme direncine karşı en iyi dayanımı göstermiştir. Kontrol numunesinin basınç dayanım değeri, 56 döngü sonunda en yüksek %8,92 düşerken HSK3 numunesi %6,14 oranında bir düşüş göstermiştir.

Çizelge 2.7. Numunelerin 0, 7, 14, 28 ve 56 DÇ çevrimi sonrasında basınç dayanımları, N/mm² (Ataş, 2013)

| DÇ Döngü Sayısı | Basınç Dayanımı (N/mm ²) | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Kontrol Numunesi | HSK1 | | | HSK2 | | | HSK3 | | |
| | | % 0,45 | % 0,55 | % 0,65 | % 0,45 | % 0,55 | % 0,65 | % 0,45 | % 0,55 | % 0,65 |
| 0 | 54,50 | 25,28 | 24,90 | 24,06 | 31,56 | 28,84 | 28,25 | 56,34 | 57,13 | 55,58 |
| 7 | 53,90 | 24,89 | 23,74 | 23,85 | 31,20 | 28,67 | 27,57 | 55,81 | 56,17 | 54,76 |
| 14 | 53,20 | 24,24 | 23,54 | 23,26 | 30,10 | 27,73 | 27,55 | 54,83 | 55,36 | 54,59 |
| 28 | 51,86 | 23,36 | 23,56 | 22,68 | 29,03 | 27,66 | 27,50 | 52,96 | 54,21 | 53,76 |
| 56 | 49,64 | 22,38 | 22,60 | 22,09 | 28,03 | 26,78 | 26,38 | 51,72 | 52,76 | 52,17 |

Yuşa Şahin (2013) tarafından yapılan bir çalışmada HSK'ların kimyasal içeriklerinin hava boşluğu oluşumuna, kararlılığına ve betonlarda kullanılmadan önce etkinliklerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar yapılmıştır. Bu amaçla köpük deneylerinin yanı sıra yüzey gerilim ölçümleri de yapılmış ve hava boşluk sistemi ile yüzey gerilimi değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada kimyasal özellikleri birbirinden farklı olan altı katkı malzemesi iki farklı oranda kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, reçine esaslı HSK'ların diğer katkılara kıyasla daha büyük ve kararlı hava boşlukları oluşturduğu bununla beraber yüzey gerilimini daha az düşürdüğü belirlenmiştir. Hava boşluğu kararlılığında, katkı kimyasına kıyasla kullanılan çimento ile süperakışkanlaştırıcı katkı uyumunun daha önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Yazar, hava sürükleyici katkıların performanslarının belirlenmesine yönelik yapılan deneylerin, süperakışkanlaştırıcı içeren betonlarda çimento-katkı uyumsuzluğu nedeniyle yanıltıcı sonuçlar verebileceğini belirtmiştir.

Puthipad ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, uçucu kül, karıştırma yöntemi ve hava sürükleyici katkı (HSK) tipinin, taze KYB harçlarındaki sürüklenmiş hava kabarcıklarının birleşimine etkisi incelenmiştir. Çalışmada 4 farklı tipte HSK kullanılmış ve 2 farklı karıştırma yöntemi uygulanmıştır. Taze betonda boşluk boyutu dağılımı AVA (air void analyzer) cihazı ile belirlenmiş olup, uçucu küllü betonlarda kontrol karışımına kıyasla sürüklenmiş hava kabarcıklarının birleşim miktarında artış olduğu tespit edilmiştir. Küresel şekilli uçucu kül taneleri, çimento parçacıklarına kıyasla hava kabarcıklarının birleşimini kolaylaştıran bir yüzey alanına sahiptir. Uçucu küllü karışımlarda, hava kabarcıkları kolayca hareket etmiş ve birleşmeler gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 2.16’te resmedilmiştir. Deney sonuçlarına göre, boşlukların birleşme miktarı kullanılan HSK tipine göre değişmektedir. İki farklı yöntem ile hazırlanan karışımlarda boşlukların birleşme miktarları kıyaslandığında, HSK’ nın süperakışkanlaştırıcı katkıdan sonra karışıma eklenmesinin boşlukların birleşim miktarını azaltacağı belirtilmiştir. Yazarlar, doğru karıştırma yöntemi ve uygun hava sürükleyici katkı maddesinin seçilmesiyle hava kabarcıklarının birleşiminin önlenebileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.16. Uçucu kül ve çimento parçacıklarının hava boşlukları ile ilişkisi (Puthipad ve ark 2018)

Çalışmada tüm harç karışımlarında istenilen yayılma değerini sağlamak için tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan mineral katkıların ve hava sürükleyici katkının çimento-su azaltıcı katkı uyumuna etkisi araştırılmıştır. Sertleşmiş hal özellikleri olarak harç karışımlarının basınç, su emme ve donma-çözülme direnci sonuçları, mineral katkı türüne ve hava sürükleyici katkı varlığına bağlı olarak kıyaslanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile karışımlarda kullanılan malzeme miktarları verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Malzemenin taze olarak kullanılmasına ve laboratuvar ortamında standartlara uygun bir şekilde korunmasına özen gösterilmiştir. Üretici firma tarafından verilen çimentonun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

| Oksit (%) | Çimento | Fiziksel özellikleri |
|--|---------|--|
| SiO ₂ | 18,86 | Özgül ağırlık 3,15 |
| Al ₂ O ₃ | 5,71 | Mekanik özellikleri |
| Fe ₂ O ₃ | 3,09 | 1-günlük 14,7 |
| CaO | 62,70 | Basınç dayanımı (MPa) 2-günlük 26,80 |
| MgO | 1,16 | 7-günlük 49,80 |
| SO ₃ | 2,39 | 28-günlük 58,5 |
| Na ₂ O+0.658 K ₂ O | 0,92 | İncelik |
| Cl ⁻ | 0,01 | Özgül yüzey (Blaine,cm ² /g) 3530 |
| Çözünmeyen kalıntı | 0,32 | 0,045 mm elekte kalıntı (%) 7,6 |
| Kızdırma kaybı | 3,20 | |
| Serbest CaO | 1,26 | |

3.1.2. Uçucu kül

Mineral katkı olarak bazı karışımlarda uçucu kül, çimento yerine kullanılmıştır. Üretici firma tarafından verilen uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Uçucu külün kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

| İçerik | U.K (%) | Fiziksel Özellikleri | U.K |
|---|--------------------|------------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 59,22 | Özgül Ağırlık | 2,31 |
| Al ₂ O ₃ | 22,86 | Blaine yüzeyi (cm ² /g) | 4300 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,31 | Puzolanik Aktivite İndeksi | |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | 88,39 | 7 günlük (%) | 70,9 |
| MgO | 1,31 | 28 günlük (%) | 77,7 |
| Na ₂ O | 0,41 | 90 günlük (%) | 91,2 |
| K ₂ O | 1,51 | | |
| SO ₃ | 0,17 | | |
| CaO | 3,09 | | |
| Serbest CaO | 0,00 | | |

3.1.3. Silis dumanı

Mineral katkı olarak bazı karışımlarda silis dumanı, çimento yerine kullanılmıştır. Üretici firma tarafından verilen silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri sırasıyla, Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Silis dumanının kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

| | S.D | | S.D |
|---|-------|------------------------------------|--------|
| İçerik | (%) | Fiziksel Özellikleri | |
| SiO ₂ | 76,70 | Özgül Ağırlık | 2,41 |
| Al ₂ O ₃ | 2,22 | Blaine yüzeyi (cm ² /g) | 35200 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,84 | | |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | 79,76 | Puzolanik Aktivite İndeksi | |
| MgO | 12,37 | 7 günlük (%) | 96,08 |
| Na ₂ O | 1,79 | 28 günlük (%) | 102,73 |
| K ₂ O | 1,55 | 90 günlük (%) | 103,70 |
| SO ₃ | 0,20 | | |
| CaO | 0,55 | | |
| Serbest CaO | 0,14 | | |

3.1.4. Agrega

Agrega olarak TS EN 196-1 standardına uygun standart kum kullanılmıştır. Kullanılan standart kumun tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 3.4’te belirtilmiştir. Agreganın özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi TS EN 1097-6 standardına uygun olarak sırasıyla, 2,72 ve kütlece %0,7 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 3.4. Standart kumun tane boyu dağılımı (CEN, TS EN 1097-6)

| Kare Göz Açıklığı | Kalan (%) | Yığılımlı Elekte Kalan (%) |
|-------------------|-----------|----------------------------|
| 2,00 | 0 | 0 |
| 1,60 | 4,32 | 7 ± 5 |
| 1,00 | 33,98 | 33 ± 5 |
| 0,50 | 67,11 | 67 ± 5 |
| 0,16 | 86,85 | 87 ± 5 |
| 0,08 | 99,83 | 99 ± 5 |

3.1.5. Su azaltıcı katkı

Hazırlanan karışımlarda istenilen yayılma değerlerini sağlamak için farklı oranlarda tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oran su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkının üretici firma tarafından verilen bazı özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Süper akışkanlaştırıcı katkı özellikleri

| Özellikler | Renk | Bağlı yoğunluk (g/cm ³) | Katı madde miktarı (%) | Ph değeri | Klorür içeriği (%) | Alkali miktarı (Na ₂ O)(%) |
|-------------------------|------------|-------------------------------------|------------------------|-----------|--------------------|---------------------------------------|
| Analiz Sonuçları | Kahverengi | 1,097 | 36,35 | 3,82 | <0,1 | <10 |

3.1.6. Hava sürükleyici katkı

Üretici firma tarafından verilen TS EN 934-2 ç.5 tipi hava sürükleyici katkı özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Hava sürükleyici katkı özellikleri

| Özellikler | Ayrışma | Renk | Bağlı yoğunluk (g/cm ³) | Katı madde miktarı (%) | Ph değeri | Klorür içeriği (%) | Alkali miktarı (Na ₂ O)(%) |
|-------------------------|---------|------------|-------------------------------------|------------------------|-----------|--------------------|---------------------------------------|
| Analiz Sonuçları | Yok | Kahverengi | 1,012 | 4,28 | 5,74 | <0,1 | <10 |

3.1.7. Su

Karışımların hazırlanmasında ve bakımında kullanılan su, Bursa ilinin şebeke suyudur.

3.2. Karışımların Hazırlanması

Bu başlıkta hamur ve harç karışımlarının hazırlanması detaylı olarak açıklanmıştır. Tüm deneysel çalışmalar Şekil 3.1'de görülen Uludağ Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmaların gerçekleştirildiği U.Ü Yapı Malzemeleri laboratuvarından bir görüntü

3.2.1. Hamur karışımlarının hazırlanması

Çalışmanın birinci aşamasında, mineral katkıların ve kimyasal katkıların uyumunu incelemek için 8 seri hamur karışımı üretilmiştir. Önceki çalışmalar dikkate alınarak marsh hunisi ve mini çökme deneyleri için hamur karışımlarının s/ç oranı 0,35 olarak seçilmiştir. Bu amaçla, her bir seri için çimento ağırlığının %0,5'i ile %2'si arasında 7 farklı oranda yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Test prosedürlerinde, Aitcin (2004) ve Kantro'nun (1980) yaptığı uygulamalar esas alınmıştır. Karışımların içerdiği malzeme miktarı Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Hamur karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları(g) ve yayılma değerleri (mm)

| Numune Adı | Çimento | UK | SD | Su | Su/B | Su | Hava |
|--------------------|---------|-----|----|-----|------|--------------------|------------|
| | | | | | | Azaltıcı Katkı (%) | Sür. Katkı |
| K | 700 | 0 | 0 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | - |
| UK | 490 | 210 | 0 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | - |
| SD | 630 | 0 | 70 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | - |
| K-UK-SD | 420 | 210 | 70 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | - |
| K-HSK | 700 | 0 | 0 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | 0,7 |
| UK-HSK | 490 | 210 | 0 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | 0,7 |
| SD-HSK | 630 | 0 | 70 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | 0,7 |
| K-UK-SD-HSK | 420 | 210 | 70 | 245 | 0,35 | 0,5-2 | 0,7 |

3.2.2. Harç karışımlarının hazırlanması

Harç karışımlar ASTM C109 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı (s/b) ve kum/bağlayıcı (k/b) oranları ile yayılma değerleri sırasıyla, 0,485, 2,75 ve 270 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Karışımlar homojen olarak hobart mikserinde hazırlanmıştır. Tüm karışımların üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları ve yayılma değerleri Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da verilmiştir. Sertleşmiş harç numuneleri Şekil 3.2’deki havuzda kür edilmiştir.

Çizelge 3.8. Mineral katkı içeren harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri

| Numune Adı | Çimento | UK | SD | Su | Kum | Su Azaltıcı Katkı | Yayılma Miktarı (mm) |
|----------------|---------|-----|----|-------|------|-------------------|----------------------|
| K | 500 | 0 | 0 | 242,5 | 1375 | 2,5 | 265 |
| UK | 350 | 150 | 0 | 242,5 | 1375 | 2,1 | 265 |
| SD | 450 | 0 | 50 | 242,5 | 1375 | 2,8 | 270 |
| K-UK-SD | 300 | 150 | 50 | 242,5 | 1375 | 2,9 | 270 |

Çizelge 3.9. Mineral katkı ve hava sürükleyici katkı içeren harç karışımların üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri

| Numune Adı | Çimento | UK | SD | Su | Kum | Su Azaltıcı Katkı | Hava Sür. Katkı | Yayılma Miktarı (mm) |
|--------------------|---------|-----|----|-------|------|-------------------|-----------------|----------------------|
| K-HSK | 500 | 0 | 0 | 242,5 | 1375 | 2,5 | 0,5 | 250 |
| UK-HSK | 350 | 150 | 0 | 242,5 | 1375 | 2,1 | 0,5 | 267 |
| SD-HSK | 450 | 0 | 50 | 242,5 | 1375 | 2,8 | 0,5 | 250 |
| K-UK-SD-HSK | 300 | 150 | 50 | 242,5 | 1375 | 2,9 | 0,5 | 260 |



Şekil 3.2. Numunelerin kür havuzundaki görüntüleri

3.3. Çalışma Kapsamında Uygulanan Deneyler

3.3.1. Hamur karışımları deneyleri

Marsh hunisi ve mini yayılma deneyi

Hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi ve mini-çökme değerleri sırasıyla, Aitcin ve Kantro'nun önerdiği yöntemlere göre yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan aletler Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Hazırlanan hamur karışımları standart bir Marsh-hunisi içine dökülmüştür. 700 mm' lik hamur karışımının huniden aktığı süre ölçülmüştür. Ölçülen bu süre karışımın Marsh-hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir. Deney yapılan bu karışım mini-çökme deneyi için de kullanılmıştır. Bu deney yönteminde; hamur karışımı düz bir zemin üzerine yerleştirilen alt iç çapı 38,1 mm, üst iç çapı 19 mm ve yüksekliği 57,2 mm olan kesik koni biçimli bir kalıbın içine doldurulur. Kalıp yukarıya doğru dikkatli bir şekilde kaldırılır ve yayılmanın gerçekleşmesi için bir süre (10-20 sn) beklenir. Yayılma çapı cetvel yardımıyla birbirine dik iki doğrultuda ölçülür. İki ölçünün

ortalaması alınır ve mini-yayılma değeri olarak kaydedilir. Hazırlanan karışımların sıcaklık değerleri de C° cinsinden belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Marsh-hunisi ve mini-yayılma deneylerinde kullanılan aletler

3.3.2. Harç karışımları deneyleri

Zamana bağlı yayılma deneyi

Harç karışımlarının 1 saat boyunca her 20 dakikada bir yayılma değerleri ASTM C1437 standardına uygun olacak şekilde ölçülmüştür. İstenilen yayılma değerini sağlamak amacı ile tek tip polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yayılma tablası ve kesik koni şekilli kalıp Şekil 3.4’te gösterilmiştir.

Yayılma tablası, üzerine çimento harcının konabileceği düz bir plakadan ve bu plakanın belirli bir yükseklikten düşürülmesini sağlayan çevirmeli kolun birleşiminden meydana gelmektedir. El yardımıyla çark döndürülerek, tablanın düşme hızı ve sayısı kullanıcı tarafından ayarlanmaktadır. Deneyde, kesik koni şeklindeki kalıbın içerisine çimento harcının yerleştirilip yüzeyi düzeltildikten sonra koninin düşey doğrultuda yukarıya doğru kaldırılmasıyla harcın yayılması sağlanmaktadır. Daha sonra alt plakadaki kol

çevrilerek serbest düşme hareketiyle sarsılan tabladaki harcın yayılma miktarı, birbirine dik iki doğrultuda ölçülüp ortalamasının alınmasıyla belirlenmektedir.



Şekil 3.4. Yayılma tablası ve kesik koni şekilli kalıp

Basınç dayanım deneyi

Söz konusu karışımların basınç dayanım değerleri ASTM C109 standardına uygun olacak şekilde 3, 7, 28 ve 90 günlük olarak belirlenmiştir. Her seri için üçer adet 50 mm'lik küp numune üretilmiş olup toplamda 96 adet numune elde edilmiştir. Numuneler, Şekil 3.5'te gösterilen deney aletinde basınç dayanım testine tabi tutulduktan sonra üçer adet numunenin, dayanım değerlerinin ortalaması alınarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.5. Basınç dayanımı ölçümü

Su emme oranı tayini

Harç karışımlarının 90 günlük su emme kapasitesi 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C642-13 standardına göre elde edilmiştir. Her seriden üçer tane olmak şartıyla toplamda 24 adet numune üretilmiştir. Bu deneyde 90 gün boyunca suda bekletilen numuneler sudan çıkartılıp yüzeyi havlu ile kurutulup doygun yüzey kuru (saturated surface dry) ağırlığı (b) ölçülmüştür. Daha sonra Şekil 3.6'daki etüvde 105°C'de değişmeyen ağırlığa kadar kurutulup, ağırlığı (a) ölçülmüştür. Harç karışımlarının su emme kapasitesi Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$S.F = \frac{b-a}{a} \times 100 \quad (3.1)$$



Şekil 3.6 Su emme deneyi için kullanılan etüv görüntüsü

Donma-çözülme deneyi

90 gün kürlenmiş küp numuneler 50, 100, 150, ve 200 donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Bu deney için toplamda 50 mm'lik 96 adet küp numune üretilmiştir. Donma-çözülme işlemi ASTM C666 "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing" standardına uygun

olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada havada donma, suda çözülme olarak hızlı yöntem uygulanmıştır. Deneyde donma sıcaklığı, $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ve çözülme sıcaklığı ise, $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Donma süresi (maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa varma süresi) 200 dakika, minimum sıcaklıktan maksimum ortam sıcaklığına varma süresi ise 60 dakika olarak 9 aşamada Şekil 3.7’de gösterildiği gibi programlanmıştır. 260 dakika süren bu işlem bir donma-çözülme çevrimi olarak kabul edilmiştir. Çalışmada uygulanan maksimum çevrim sayısı 200’dir ve yaklaşık olarak 40 gün sürmüştür. Deney kabini ve kabin içerisine yerleştirilmiş numuneler sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

| DENEY TAKIP EKRANI | | | | | PROGRAM NO | TEKRAR | | | |
|--------------------|-------|----------|---------|---------|------------|--------|----------|---------|---------|
| | | | | | 5 | 30 | | | |
| ADIM NO | RAMPA | SICAKLIK | BEKLEME | ÇÖZÜLME | ADIM NO | RAMPA | SICAKLIK | BEKLEME | ÇÖZÜLME |
| 1 | 10.dk | 20.0°C | 10.dk | 0.dk | 9 | 40.dk | -20.0°C | 45.dk | 60.dk |
| 2 | 5.dk | 15.0°C | 5.dk | 0.dk | 10 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |
| 3 | 5.dk | 10.0°C | 5.dk | 0.dk | 11 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |
| 4 | 5.dk | 5.0°C | 5.dk | 0.dk | 12 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |
| 5 | 5.dk | 0.0°C | 5.dk | 0.dk | 13 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |
| 6 | 10.dk | -5.0°C | 5.dk | 0.dk | 14 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |
| 7 | 20.dk | -10.0°C | 20.dk | 0.dk | 15 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |
| 8 | 30.dk | -15.0°C | 30.dk | 0.dk | 16 | 0.dk | 0.0°C | 0.dk | 0.dk |

Şekil 3.7. Donma-çözülme deneyi takip ekranı



Şekil 3.8. Donma-çözülme deney kabini



Şekil 3.9. Donma-çözülme kabinine yerleştirilen numuneler

Mikroskop altında fotoğraflama

Tüm serilerin 200 donma-çözülme çevrim sonrası mikroskop görüntüleri kaydedilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hamur Deneyleri Sonuçları

4.1.1. Marsh hunisi ve mini yayılma

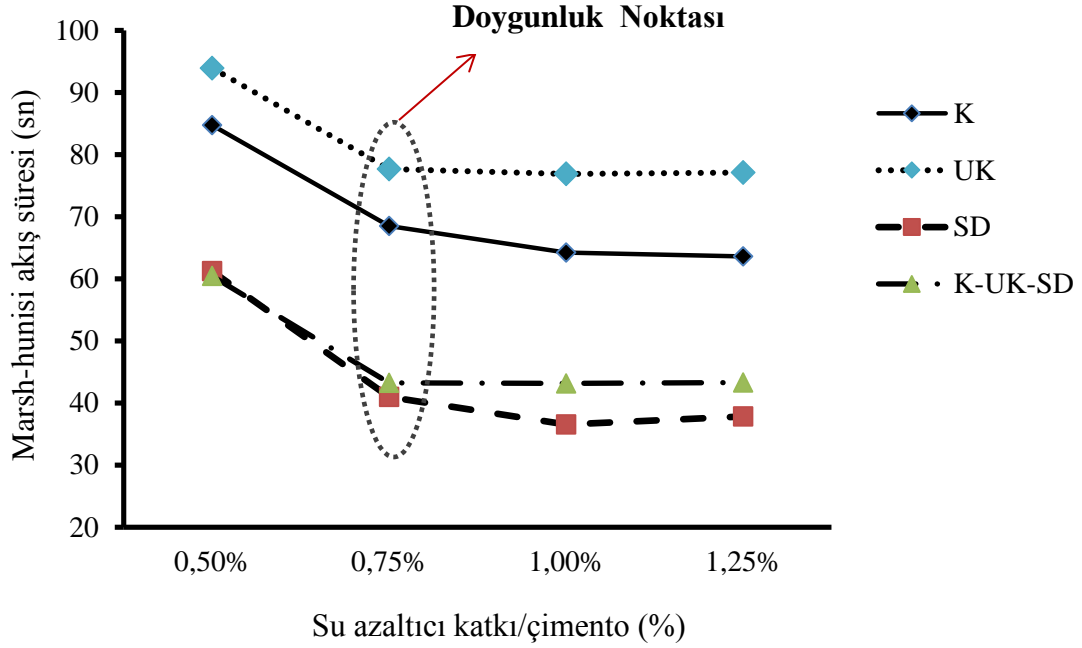
Hamur karışımları üzerinde gerçekleştirilen Marsh-hunisi ve mini-çökme deneylerinden elde edilen sonuçlar bu bölümde incelenmiştir. Sadece mineral katkıların ve akışkanlaştırıcı katkının kullanımıyla elde edilen UK, SD ve K-UK-SD serilerinin sonuçları, kontrol (K) karışımı ile kıyaslamalı olarak Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, mineral katkı kullanımından bağımsız olarak, su azaltıcı katkı oranının artışıyla karışımların Marsh-hunisi akış süreleri beklenildiği gibi azalmıştır. Ancak su azaltıcı katkı miktarı belirli bir değerin üstüne çıktığında çimento hamurlarının akış sürelerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Söz konusu su azaltıcı katkı dozajı çimento-katkı ikilisi için doygunluk noktası olarak tanımlanmaktadır (Mardani-Aghabaglou ve ark. 2017b). Tüm karışımlarda su azaltıcı katkının doygunluk noktası su azaltıcı katkı/çimento oranının %0,75’i olduğu durumda gerçekleşmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, katkının doygunluk noktası mineral katkı kullanımından etkilenmemiştir. Doygunluk noktasındaki Marsh-hunisi akış süreleri dikkate alındığında, uçucu kül içeren karışımların akış süreleri kontrol karışımına kıyasla %12 daha fazla olmuştur. Silis dumanı içeren karışımlarda beklentinin tersine bir sonuç elde edilmiştir. Bilindiği gibi, silis dumanı çimentoya göre daha yüksek inceliğe sahip olduğundan karışımın işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Ancak, burada silis dumanı içeren karışımların akış süresi kontrol karışımına kıyasla %40 daha düşük çıkmıştır. Silis dumanı kullanımı ile karışımda toplam ince malzeme miktarı artmaktadır. Karışımların toplam ince malzeme miktarının artışıyla Marsh-hunisi akış süresinin azalması su azaltıcı katkının ince taneler üzerinde daha kolay adsorbe olabilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Ali Mardani-Aghabaglou ve ark. (2017b) tarafından da ifade edilmiştir. Söz konusu çalışmada, tek tip Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento öğütülerek dört farklı Blaine inceliğine sahip çimento elde edilmiştir. Çimento inceliğinin artışıyla Marsh-hunisi akış sürelerinin kısaldığı yazarlar tarafından bildirilmiştir. Yazarlar bu etkiyi, çimentolu sistemde su azaltıcı katkı yeterli miktarda olduğunda katkının ince taneler üzerinde daha kolay adsorbe olabileceği gerekçesi ile açıklamışlardır. Ancak daha az miktarda su azaltıcı katkı içeren karışımlarda çimento

inceliğinin artışıyla karışımların işlenebilirliğinin azaldığı yazarlar tarafından tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, Marsh-hunisi deneyinde, deneyin yapılışına bağlı olarak yeterli miktarda su azaltıcı katkı içeren çok akıcı bir karışımın elde edilmesi gerekmektedir.

Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri dikkate alındığında mineral katkı kullanımından bağımsız olarak, su azaltıcı katkı kullanımıyla karışımların mini-çökme değerleri azalmıştır. Bu olay, su azaltıcı katkı kullanımı ile karışımların eşik kayma gerilme değerlerinin azalmasından kaynaklanmaktadır (Mardani-Aghabaglou 2016). Ancak, belli bir katkı kullanım oranının üstünde karışımların yayılma değerleri değişmemiştir. Hamur karışımlarının doygunluk noktasındaki mini-çökme değerleri kıyasladığında Marsh-hunisinde elde ettiğimiz benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Karışımların sıcaklık değişimine baktığımızda, katkı miktarı artışıyla ve mineral katkının kullanımıyla sıcaklık değerlerinde ciddi mertebede değişikliklere rastlanmamıştır.

Çizelge 4.1. HSK içermeyen hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri

| Katkı/çimento oranı (kütlece %) | | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Akış süresi,sn | K | 84,7 | 68,5 | 64,2 | 63,6 | 63,9 | 65,8 | 67,3 |
| | UK | 93,9 | 77,6 | 76,8 | 77,1 | 80,8 | 86,5 | 90,4 |
| | SD | 61,2 | 40,9 | 36,5 | 37,8 | 38,1 | 38,6 | 38,5 |
| | K-UK-SD | 60,4 | 43,2 | 43,1 | 43,2 | 44 | 45,5 | 47,1 |
| Mini-çökme, cm | K | 17,5 | 20 | 19,5 | 18,5 | 19 | 20 | 20 |
| | UK | 17 | 18 | 19 | 18 | 18,5 | 17 | 18,5 |
| | SD | 15 | 19 | 20 | 20,5 | 20 | 21 | 19,5 |
| | K-UK-SD | 16 | 17 | 18 | 18,5 | 18,5 | 18,5 | 19,5 |
| Sıcaklık, °C | K | 29,3 | 28,8 | 27,6 | 27,3 | 27,5 | 27,4 | 27,9 |
| | UK | 32,3 | 31,6 | 31,4 | 29,5 | 29,1 | 28,4 | 27,6 |
| | SD | 32,3 | 31,5 | 30,7 | 30,2 | 29 | 29 | 27,9 |
| | K-UK-SD | 34,7 | 32,5 | 31,7 | 30,4 | 30,2 | 29,4 | 29,2 |



Şekil 4.1. HSK içermeyen hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süreleri

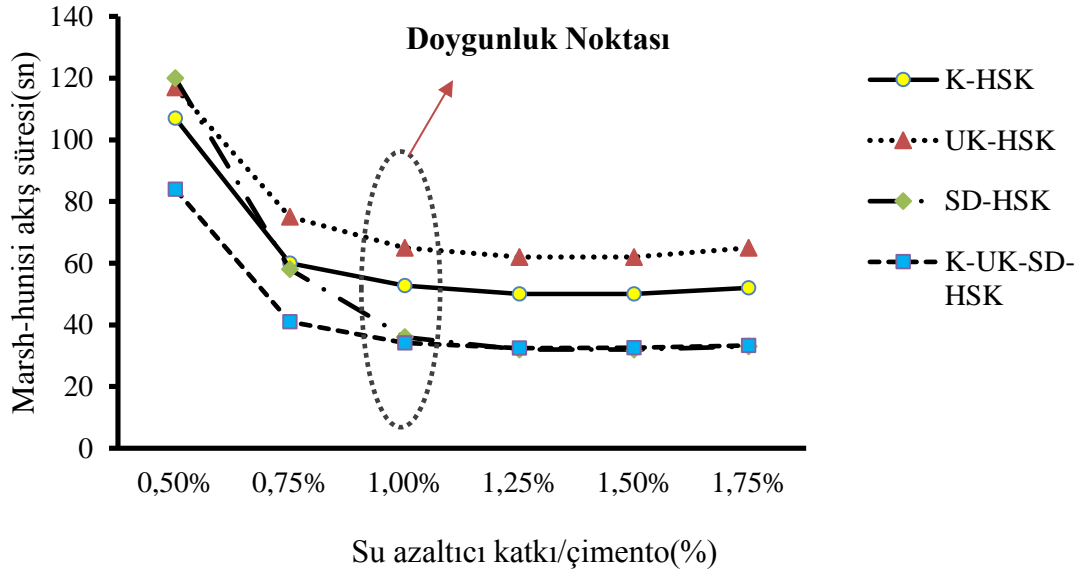
HSK içeren hamur karışımları üzerinde gerçekleştirilen Marsh-hunisi ve mini-çökme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Beklenildiği gibi, su azaltıcı katkı oranının artışıyla karışımların Marsh-hunisi akış süreleri azalmıştır. Tüm karışımlarda su azaltıcı katkının doğunluk noktası su azaltıcı katkı/çimento oranının %1’i olduğu durumda gerçekleşmiştir. Doğunluk noktasındaki Marsh-hunisi akış süreleri dikkate alındığında, kontrol karışımının akış süresi UK-HSK karışımının akış süresine kıyasla %20 daha düşük olmuştur. Ancak, kontrol karışımının katkı doğunluk noktasındaki akış performansı SD-HSK ve K-UK-SD-HSK hamur karışımlarına kıyasla sırasıyla, %31 ve %36 oranında daha düşük olduğu sonuçlardan da anlaşılmıştır. Marsh hunisi akış performansı bakımından en başarılı karışımlar SD-HSK ve K-UK-SD-HSK karışımları olurken UK-HSK karışımı en olumsuz akış performansı gösteren karışım olmuştur. Doğunluk noktasında SD-HSK ve K-UK-SD-HSK karışımlarının akış süresi UK-HSK karışımından yaklaşık %45-48 kadar daha düşük olmuştur.

Dolayısıyla silis dumanı kullanımı ile hamur karışımlarının akış performansı olumlu etkilenmiştir. Bu çalışmada kullanılan silis dumanının çimentoya kıyasla 10 kat daha incedir. Bilindiği gibi karışımda ince malzeme miktarı artışıyla toplam yüzey alanı

artacağından benzer işlenebilirliği sağlamak için su ihtiyacı artmaktadır. Ancak, Mardani-Aghabaglou ve arkadaşlarına göre (2017b), çimentolu sistemlerde yeterli miktarda su azaltıcı katkı bulunması durumunda bağlayıcı inceliğinin artmasıyla beklenen olumsuz davranışın tersine karışımların akış performansı olumlu etkilenmektedir. Yazarlar bu olumlu etkinin su azaltıcı katkının karışımdaki daha ince taneler üzerine daha kolay adsorbe olabilmesinden kaynaklandığı beyan etmişlerdir. SD-HSK karışımı %0,5 oranında su azaltıcı katkı içermesi durumunda karışımlar arasında en olumsuz akış performansını gösterirken doygunluk noktasında ve daha fazla katkı oranlarında en olumlu davranış sergileyen karışımlardan biri olmuştur. Hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren K-UK-SD-HSK karışımı SD-HSK karışımına benzer Marsh-hunisi akış davranışı sergilemiştir.

Çizelge 4.2. HSK içeren hamur karışımlarının Marsh-hunisi akış süresi, mini-çökme ve sıcaklık değerleri

| Katkı/çimento oranı (kütlece %) | | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 |
|--|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Akış süresi, sn | K-HSK | 107 | 60 | 52,7 | 50 | 50 | 52 | 54 |
| | UK-HSK | 117 | 75 | 65 | 62 | 62 | 65 | 65 |
| | SD-HSK | 120 | 58 | 36 | 32 | 32 | 33 | 34 |
| | K-UK-SD- HSK | 84 | 41 | 34,1 | 32,4 | 32,5 | 33,3 | 34,2 |
| Mini- çökme, cm | K-HSK | 11,5 | 16 | 17 | 19,2 | 17,2 | 18,5 | 18,7 |
| | UK-HSK | 14,7 | 17,5 | 18 | 18 | 17 | 17,2 | 16 |
| | SD-HSK | 10 | 12,5 | 18,5 | 20 | 19,5 | 19,5 | 18,5 |
| | K-UK-SD- HSK | 11,5 | 17,5 | 19 | 20 | 18 | 18,2 | 20,5 |
| Sıcaklık, °C | K-HSK | 37,4 | 37,4 | 37,4 | 35,8 | 34,7 | 33,8 | 33,8 |
| | UK-HSK | 36,7 | 34,1 | 33,6 | 32,2 | 32,2 | 31,7 | 31,7 |
| | SD-HSK | 37,8 | 37,8 | 36,6 | 35,2 | 34,4 | 34,2 | 34 |
| | K-UK-SD- HSK | 38,9 | 36,8 | 36,8 | 34,4 | 33,6 | 33 | 33 |



Şekil 4.2. HSK içeren hamur karışımlarının katkı dozajına bağlı olarak Marsh-hunisi akış süreleri

Hamur karışımlarının mini-çökme değerleri dikkate alındığında mineral katkı kullanımından bağımsız olarak, su azaltıcı katkı kullanımıyla karışımların mini-çökme değerleri azalmıştır. Ancak, belli bir katkı kullanım oranının üstünde karışımların yayılma değerleri değişmemiştir. Hamur karışımlarının doygunluk noktasındaki mini-çökme değerlerini kıyasladığımızda Marsh-hunisinde elde ettiğimiz benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Karışımların sıcaklık değişimine baktığımızda, katkı miktarı artışıyla ve mineral katkının kullanımıyla sıcaklık değerlerinde ciddi mertebede değişikliklere rastlanmamıştır.

4.2. Harç Karışımları Sonuçları

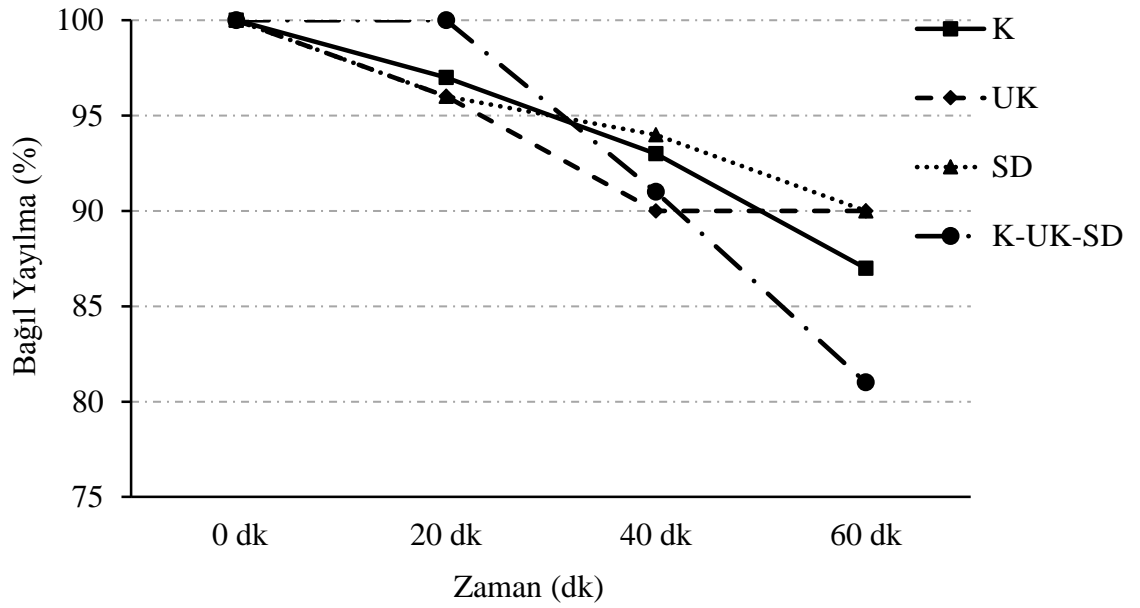
4.2.1. Zamana bağlı yayılma deneyi

Hazırlanan harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri Çizelge 4.3 ve bağlı yayılma değerleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Beklenildiği gibi mineral katkı kullanımından bağımsız olarak harç karışımlarının yayılma miktarları zamanla azalmıştır. Daha önce de vurgulandığı gibi, tüm harç karışımlarının yayılma değeri 270 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur. Çizelge 3.8'de de görüldüğü gibi söz konusu yayılma değerini sağlamak için, silis dumanı içeren SD karışımlarında kontrol karışımına kıyasla %10 oranında katkı

gereksinimi artmıştır. Ancak, %30 oranında uçucu kül içeren UK karışımında, kontrol karışımına kıyasla %15 daha az katkı kullanılarak istenilen yayılma değeri sağlanmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, kontrol karışımına kıyasla %30 oranında uçucu kül içeren UK karışımında istenilen yayılma değerini sağlamak için katkı gereksinimi %15 mertebesinde azalmasına rağmen, 60 dakika sonunda %7 daha fazla yayılma kaybı göstermiştir. Hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip K-UK-SD karışımı, 60 dakika sonunda kontrol karışımına kıyasla %15 daha fazla yayılma kaybı göstermiştir. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi genel olarak mineral katkı kullanımı karışımların yayılma değerlerini olumsuz etkilemiştir. Söz konusu bu olumsuz etki zamanla daha belirgin hale gelmiştir. Mineral katkı kullanımının harç karışımlarının yayılma değerine etkisi, hamur karışımlarının marsh hunisi sonuçlarına etkisi ile çelişkili olmuştur. Hamur karışımları sonuçları bölümünde de anlatıldığı gibi su azaltıcı katkının yeterli miktarda mevcut olduğu durumlarda ince malzeme miktarı artışının taze hal özellikleri üzerindeki olumsuz etkisi çok baskın olmamıştır. Beklenildiği gibi, mineral katkı kullanımı ile karışımın ince malzeme miktarı arttığından karışımın işlenebilirliği olumsuz etkilenmektedir.

Çizelge 4.3. HSK içermeyen harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri (mm)

| Numune/Zaman | 0 dk | 20 dk | 40 dk | 60 dk |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| K | 257,5 | 250 | 240 | 225 |
| UK | 267,5 | 257,5 | 240 | 240 |
| SD | 277,5 | 267,5 | 260 | 250 |
| K-UK-SD | 270 | 270 | 245 | 220 |



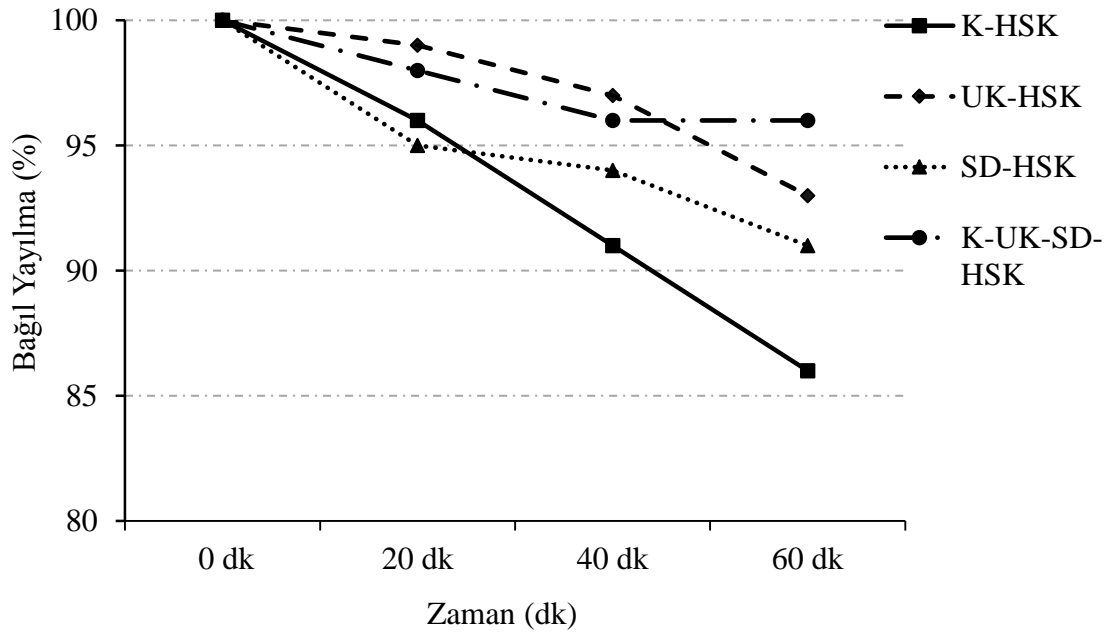
Şekil 4.3. HSK içermeyen harç karışımlarının zamana bağlı bağıl yayılma değerleri

Çimento ağırlığının %0,1'i oranında HSK ve uçucu kül ile silis dumanı kullanılarak hazırlanan karışımların 60 dakika boyunca zamana bağlı yayılma değerleri Çizelge 4.4 ve bağıl yayılma değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Daha önce de vurgulandığı gibi, tüm harç karışımlarının yayılma değeri 270 ± 20 mm olarak sabit tutulmuş ve 60 dakika boyunca yayılma değerleri ölçülmüştür. Beklenildiği gibi kullanılan katkılardan bağımsız olarak harç karışımların yayılma miktarları zamanla azalmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 60 dakika sonunda %10 oranında UK ve %30 oranında SD içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip K-UK-SD-HSK karışımı, %4 yayılma kaybı ile en başarılı karışım olmuştur. Kontrol (K-HSK) karışımında yayılma kaybı %14 olarak ölçülürken, %10 oranında SD içeren SD-HSK karışımında %9, %30 oranında UK içeren UK-HSK karışımında ise bu değer %7 olarak hesaplanmıştır. Bilindiği üzere hava sürükleyici katkıları, karışım içerisinde küresel ve birbiriyle bağlantısı olmayan düzenli küçük boşluklar oluşturan katkılarıdır. Bu küresel ve düzenli boşluklar sayesinde karışımların taze halde işlenebilirliğine olumlu etkisinin olduğu ve kıvam kaybını da olumlu yönde etkilediği bilinmektedir (Kosmatka ve ark. 2002). Silis dumanı içeren karışımlarda Çizelge 3.9'dan da görüldüğü gibi hedef yayılma değerini sağlamak için gerekli katkı miktarı kontrol karışımına göre daha fazla olmuştur. Silis dumanının çimento ve UK'dan daha ince olmasından dolayı söz konusu SD-HSK ve K-UK-SD-HSK karışımlarının katkı ihtiyacını artırdığı düşünülmektedir. UK-HSK karışımında bulunan uçucu külün

yapısının dairesel olması karışımın işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemiş ve hedef yayılma için gerekli katkı miktarı kontrol (K-HSK) karışımından daha az olmuştur. Harç karışımlarında SD ve UK mineral katkılarının HSK ile birlikte kullanılması karışımların zamana bağlı yayılma davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir.

Çizelge 4.4. HSK içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri (mm)

| Numune/Zaman | 0 dk | 20 dk | 40 dk | 60 dk |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| K-HSK | 250 | 240 | 227,5 | 215 |
| UK-HSK | 267,5 | 265 | 260 | 250 |
| SD-HSK | 247,5 | 235 | 232,5 | 225 |
| K-UK-SD-HSK | 270 | 265 | 260 | 260 |

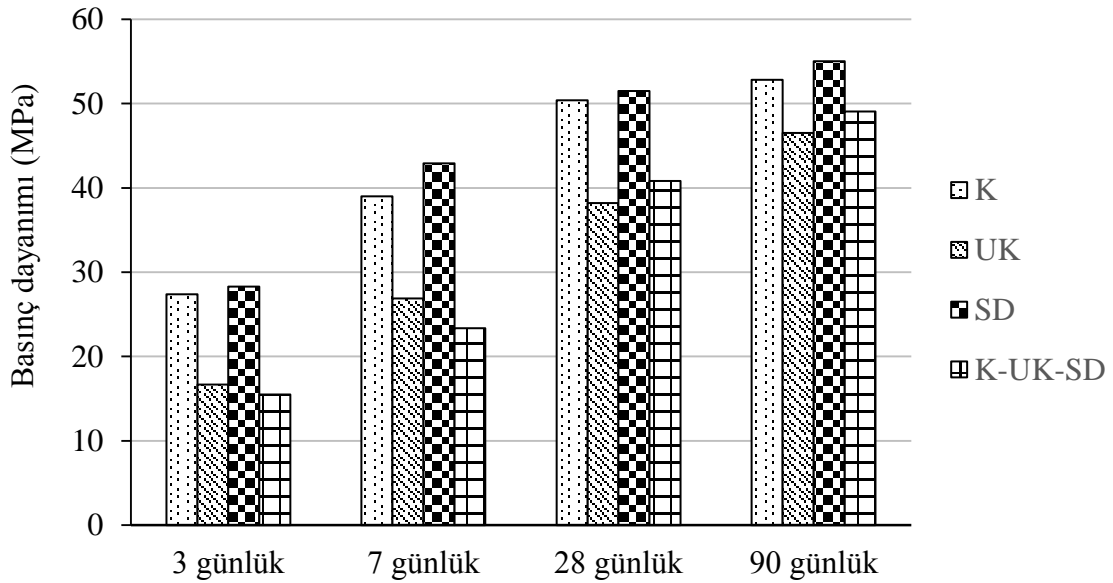


Şekil 4.4 HSK içeren harç karışımlarının zamana bağlı bağıl yayılma değerleri

4.2.2. Basınç dayanım deneyi

Harç karışımlarının 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Her değer üç ölçümün ortalaması olarak elde edilmiştir. Şekil 4.5'ten de anlaşıldığı gibi, kontrol karışımına kıyasla %30 uçucu kül içeren UK karışımının basınç dayanımı başlangıçtan itibaren daha düşük çıkmıştır. Bu olumsuz etkiye 90 günlük

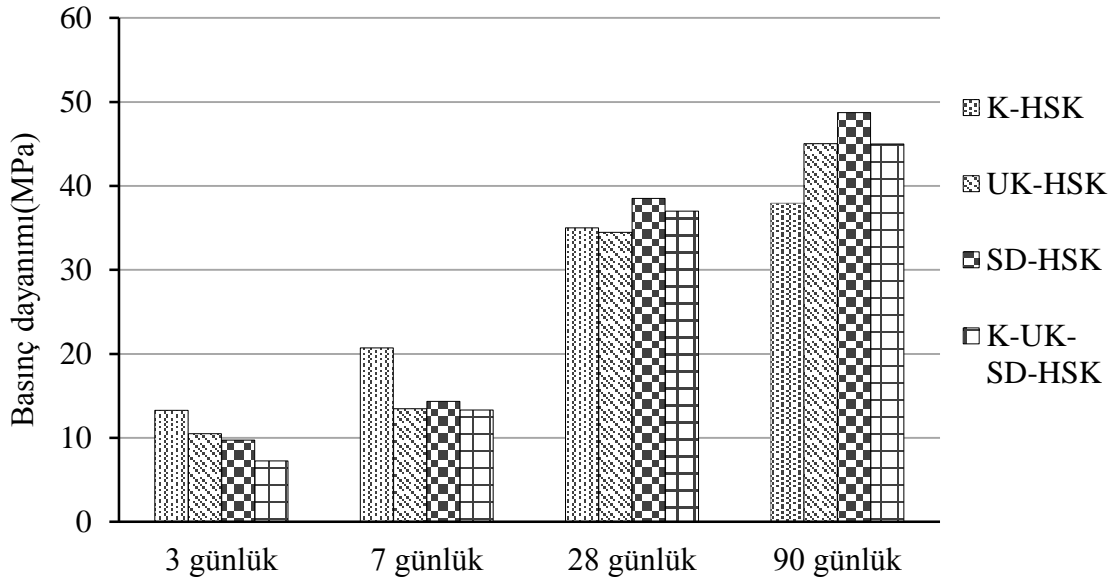
örneklerde de rastlanmıştır. Ancak, dayanımlar arasındaki farkın zamanla azaldığı gözlemlenmiştir. Silis dumanı içeren SD karışımı başlandıktan itibaren en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Ancak, uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD karışımı başlangıçtan itibaren kontrol karışımından daha düşük dayanım göstermesine rağmen, 90 gün sonunda kontrol karışımı ile benzer sonuç vermiştir. Silis dumanı yüksek puzolanik aktivite indeksi değerine sahip olduğu için basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılan uçucu külün puzolanik aktivite indeksi silis dumanına kıyasla daha düşük olduğundan dayanım üzerindeki performansı silis dumanına göre daha düşük olmuştur.



Şekil 4.5. Harç karışımlarının basınç dayanımları (MPa)

HSK içeren harç karışımların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Her bir karışıma ait olan 50 mm'lik üç adet küp numunenin basınç dayanım değerleri belirlenerek ortalaması alınmıştır. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 3 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri dikkate alındığında, mineral katkı içeren karışımların basınç dayanım değerleri, kontrol karışımına kıyasla daha düşük çıkmıştır. Ancak, 28 günden sonra mineral katkıların fiziko-kimyasal etkisi ile birlikte dayanım değerlerinde artışlar görülmüştür. Mineral katkı içeren karışımların basınç dayanım değerleri, 90 günlük örneklerde kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır. 90 günlük basınç dayanım değerlerine göre, UK-HSK ve K-UK-SD-HSK karışımları birbirine yakın sonuçlar gösterirken, en başarılı karışım basınç dayanımı 48,75 MPa olan ve %10 oranında silis

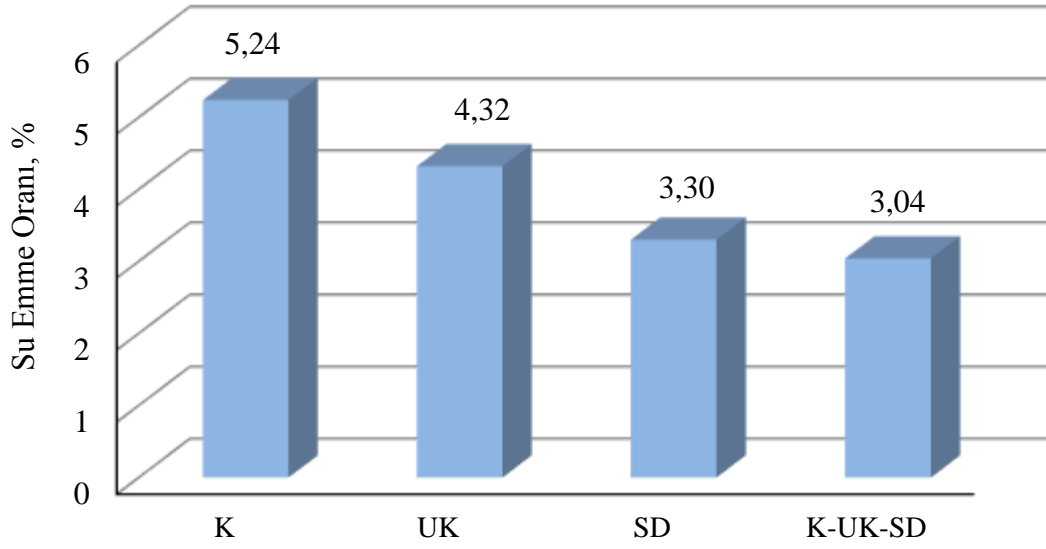
dumanı içeren SD-HSK serisi olmuştur. Silis dumanı yüksek puzolanik aktivite indeksi değerine sahip olduğu için karışımların 90 günlük basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılan uçucu külün puzolanik aktivite indeksi silis dumanına kıyasla daha düşük olduğundan dayanım üzerindeki performansı silis dumanına göre daha düşük olmuştur. Ayrıca, mineral katkı içeren karışımlara HSK eklenerek sonradan oluşturulan hava boşlukları sebebiyle, karışımların 90 günlük basınç dayanım değerlerinde genel bir düşüş görülmüştür.



Şekil 4.6. HSK içeren harç karışımlarının basınç dayanımları (MPa)

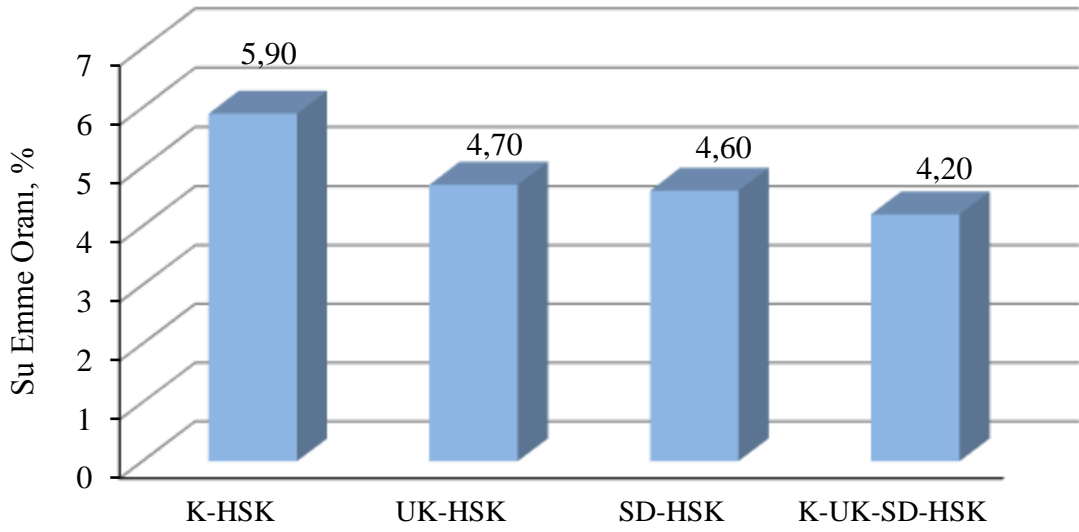
4.2.3. Su emme oranı tayini

Harç karışımlarının 90 günlük su emme oranları, standarda uygun olarak gerçekleştirilen üç farklı ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanarak Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, mineral katkı tipinden bağımsız olarak, mineral katkı içeren harç karışımların 90 günlük su emme değerleri kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD karışımı su emme performansı açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım kontrol karışımına kıyasla %42 daha geçirimsiz olmuştur. Mineral katkının su emme oranları üzerindeki olumlu etkisinin, mineral katkının fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklandığı daha önce de vurgulanmıştır.



Şekil 4.7. Harç karışımlarının 90 günlük su emme oranı

HSK içeren harç karışımlarının 90 günlük su emme oranı Şekil 4.8’de verilmiştir. Her sonuç üç ölçümün ortalaması olarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, mineral katkı tipinden bağımsız olarak, mineral katkı içeren harç karışımların 90 günlük su emme değerleri kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD-HSK karışımı su emme performansı açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım kontrol karışımına kıyasla %29 daha geçirimsiz olmuştur. Mineral katkının su emme oranları üzerindeki olumlu etkisinin, mineral katkının fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklandığı daha önce de vurgulanmıştır. HSK içeren karışımların su emme oranlarında, yalnızca mineral katkıların ikamesi ile hazırlanan karışımlara kıyasla düşük miktarlarda artışlar gözlemlenmiştir (Özyıldırım 2007).



Şekil 4.8. HSK içeren harç karışımlarının 90 günlük su emme oranı

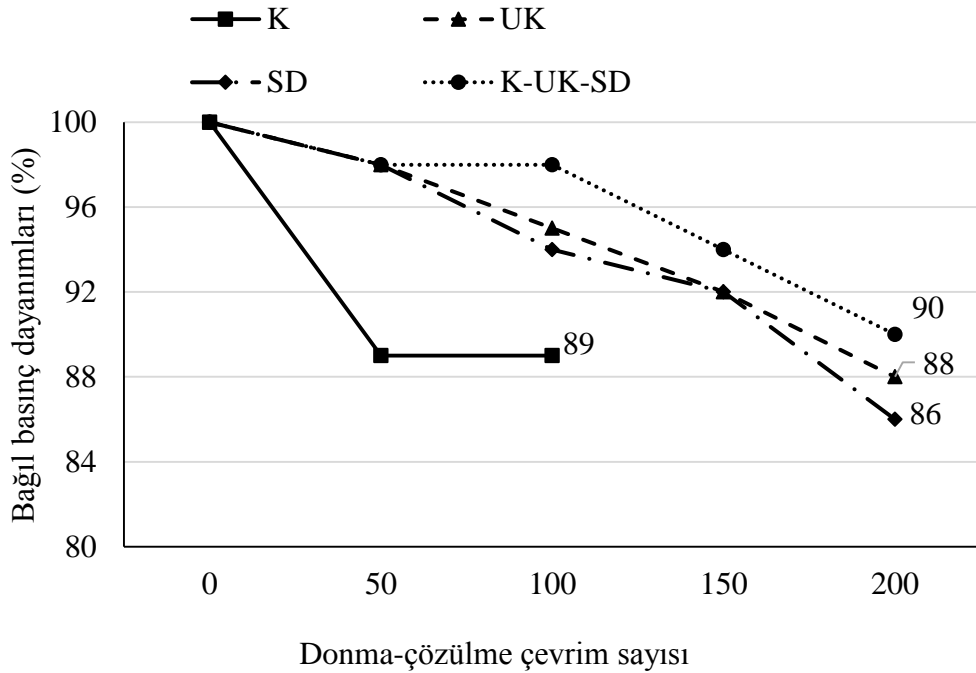
4.2.4. Donma-çözülme deneyi

90 gün kür edilmiş küp numunelerin 0, 50, 100, 150 ve 200 donma-çözülme çevrim sonrası bağıl basınç dayanımları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Beklenildiği gibi donma-çözülme çevrim sayısının artmasıyla birlikte, mineral katkı tipinden bağımsız olarak numunelerin basınç dayanım değerleri azalmıştır. Çizelge 4.5’te yer alan sonuçlardan anlaşıldığı gibi, Kontrol (K) numunesinin, 100 donma-çözülme çevriminden sonra basınç dayanım değerleri tespit edilememiş ve numuneler yeterli direnç gösteremeyerek parçalanmıştır. Bu çalışmada, bağlayıcı olarak yalnızca Portland çimentosunun kullanıldığı K serisi, donma-çözülme etkisine karşı en başarısız seri olarak belirlenmiştir. Mineral katkı içeren seriler arasında, 200 çevrim sonunda en fazla basınç dayanım kaybı, %14 oranı ile SD serisinde görülmüştür. Çimento ağırlığının %30’u oranında uçucu kül içeren UK karışımı ise 200 çevrim sonunda %12 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD serisi, 200 çevrim sonunda %10 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır. Mineral katkı kullanımı ile birlikte karışımların donma-çözülme olayına karşı gösterdikleri direnç artmıştır. Bu bağlamda, diğer mineral katkılı serilere kıyasla üçlü bağlayıcı sisteme sahip olan K-UK-SD serisinde bulunan toplam ince malzeme miktarının artışıyla birlikte, karışımların boşluk oranı ve geçirimsizliği azalmış, bunun yanı sıra meydana gelen kimyasal tepkimeler sonucunda oluşan yeni CSH’lar sayesinde daha dayanıklı numuneler elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. 90 gün kür edilmiş HSK içermeyen numunelerin 0-200 donma-çözülme çevrimi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri

| Seri Adı | Çevrim Sayısı | | | | |
|----------------|---------------|----|-----|-----|-----|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| K | 100 | 89 | 89 | -* | -* |
| UK | 100 | 98 | 95 | 92 | 88 |
| SD | 100 | 98 | 94 | 92 | 86 |
| K-UK-SD | 100 | 98 | 98 | 94 | 90 |

(* : K numunesi; 100 donma-çözülme çevriminden sonra parçalanmış ve ölçüm alınamamıştır.)



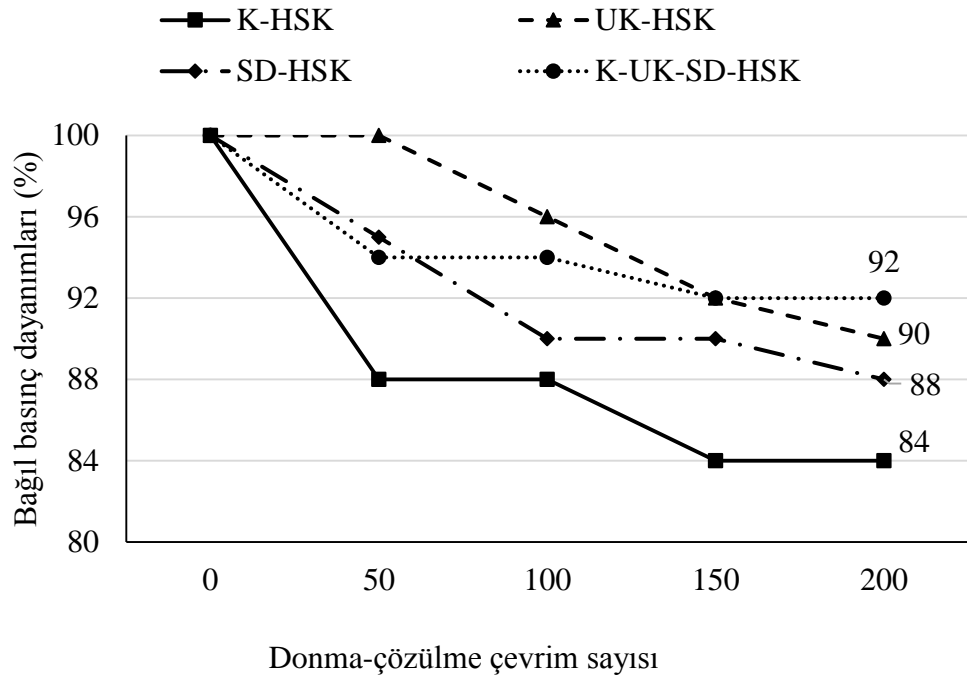
Şekil 4.9. HSK içermeyen 90 günlük numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri

90 gün kür edilmiş HSK içeren küp numunelerin 0, 50, 100, 150 ve 200 donma-çözülme çevrim sonrası bağıl basınç dayanımları Çizelge 4.6 ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Beklenildiği gibi donma-çözülme çevrim sayısının artmasıyla birlikte numunelerin basınç dayanım değerleri azalmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 200 çevrim sonunda en fazla basınç dayanım kaybı %16

oranı ile Kontrol (K-HSK) serisinde görülmüştür. Kontrol (K-HSK) serisine ait numuneler 50 çevrim sonrasında dahi yüksek oranda basınç dayanım kaybına uğramış ve mineral katkı içeren karışımlara kıyasla donma-çözülme çevrimine karşı yeterli direnç gösterememiştir. Çimento ağırlığının %30'u oranında uçucu kül içeren UK-HSK karışımı ile çimento ağırlığının %10'u oranında silis dumanı içeren SD-HSK karışımının basınç dayanım kaybı sırasıyla %10 ve %12 olarak hesaplanmıştır. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD-HSK serisi donma-çözülme çevrimlerine karşı en başarılı performansa sahip karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım 200 çevrim sonunda %8 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır. Bilindiği gibi mineral katkı kullanımı çimentolu sistemlerin davranışını etkilemektedir. Bahsedilen bu etkinin, kullanılan katkıların fiziko-kimyasal özelliklerinden kaynaklandığı daha önce de vurgulanmıştır. Mineral katkıların puzolonik özelliğinin yanı sıra karışımlarda ince malzeme miktarını artırarak boşluk hacmini azalttığı ve buna bağlı olarak karışımların durabilite performanslarını artırıcı etkisi olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.6. 90 gün kür edilmiş HSK içeren numunelerin 0-200 donma-çözülme çevrimi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri

| Seri Adı | Çevrim Sayısı | | | | |
|--------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| K-HSK | 100 | 88 | 88 | 84 | 84 |
| UK-HSK | 100 | 100 | 96 | 92 | 90 |
| SD-HSK | 100 | 95 | 90 | 90 | 88 |
| K-UK-SD-HSK | 100 | 94 | 94 | 92 | 92 |



Şekil 4.10. HSK içeren 90 günlük numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri

Sonuçlardan da görüldüğü gibi (bkz. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10), 200 donma-çözülme çevrimi sonunda HSK kullanılan serilerin bağıl basınç dayanım kayıpları, HSK kullanılmayan serilere kıyasla daha düşük olmuştur. Çalışmada, HSK kullanımı ile çimentolu sistemlerde oluşturulan düzenli boşluk sisteminin, henüz donmamış sular için bir kaçış noktası oluşturmasıyla birlikte hidrolik basıncı azaltarak meydana gelebilecek hasarları önleyebileceği daha önce de vurgulanmıştır.

4.2.5. Donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin mikroskobik incelemesi

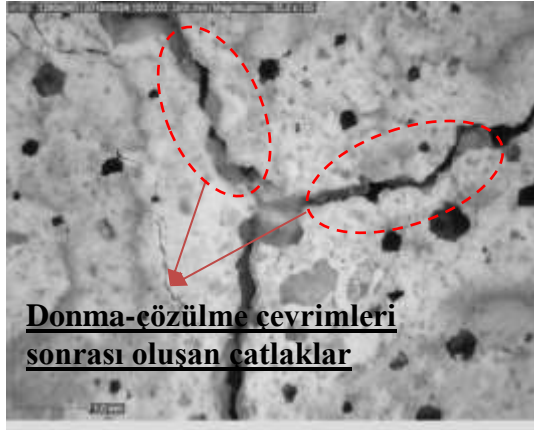
200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen K ve K-HSK numunelerinin mikroskobik yüzey görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, HSK içermeyen K karışımında 200 donma-çözülme çevrim sonrası derin çatlaklar oluşmuştur. Ancak HSK içeren karışımında 200 donma-çözülme çevrim sonrası her hangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Literatürde de benzer sonuçlar görülmekte olup bunun nedeni olarak, HSK kullanımıyla birlikte karışımında homojen yapıda bir boşluk sistemi oluşması ve bu sistemin henüz donmamış olan sular için güvenli kaçış noktaları sağlaması nedeniyle içsel gerilmelerin artmaması gösterilmiştir. (Pigeon ve Pleau 1995, Neville 1997).

200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen UK ve UK-HSK numunelerinin mikroskobik yüzey görüntüsü Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, HSK içeren UK-HSK (b) numunesinde oluşan boşluk sistemi, (a) numunesine kıyasla oldukça belirgin bir haldedir. Karışımlarda HSK kullanılarak sonradan oluşturulan bu boşlukların, numunelerin donma-çözülme etkisine karşı direncini artırdığı bilinmektedir (Snyder 1998).

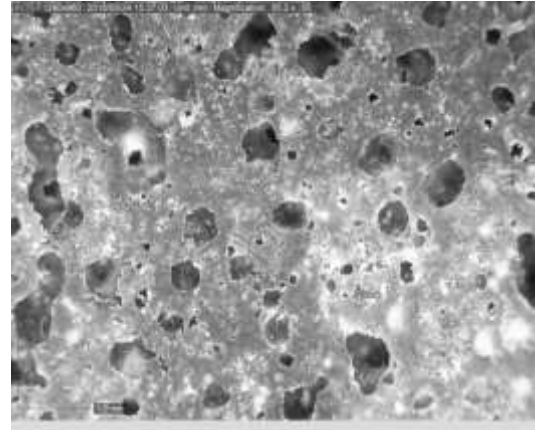
200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen SD ve SD-HSK numunelerinin mikroskobik yüzey görüntüsü Şekil 4.13’te verilmiştir. Silis dumanı da diğer mineral katkıları gibi, puzolanik reaksiyon sonucu kalsiyum hidroksitleri (CH) daha güçlü bir yapıya sahip olan ve çimentolu sistemlere bağlayıcılık özelliği kazandıran kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüştürmektedir. Fiziksel olarak gözeneklerin azalmasıyla birlikte güçlü bir agrega-hamur ara yüzeyi oluşturarak, çimentolu sistemlerin dayanım ve dayanıklılığını artırmaktadır (Mehta ve Monteiro 2010). Şekil 7(b)’de HSK etkisiyle birlikte numunede oluşan küresel şekilli ve birbirinden bağımsız düzenli hava boşlukları görülmektedir.

200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen üçlü bağlayıcı sisteme sahip K-UK-SD ve K-UK-SD-HSK numunelerinin mikroskobik yüzey görüntüsü Şekil 4.14’te verilmiştir. Çimentolu sistemlerde uçucu kül ve silis dumanının birlikte kullanılmasıyla büyük gözeneklerin azaldığı ve dayanıklılığın arttığı

bilinmektedir (Shon ve ark. 2018). Kullanılan HSK maddesiyle birlikte numunelerde istenen boşluk oluşumu sağlanmış (b) ve donma-çözülme etkisine karşı direncin artması hedeflenmiştir.

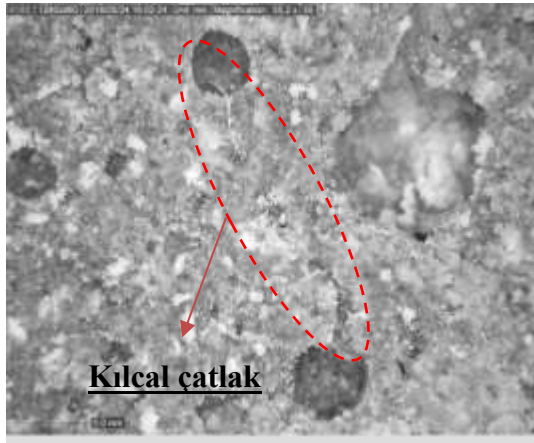


(a)

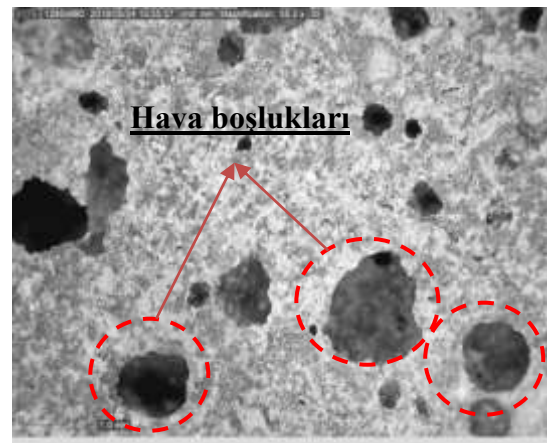


(b)

Şekil 4.11. 200 çevrim sonrası mikroskobik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen K numunesi; (b) HSK içeren K-HSK numunesi

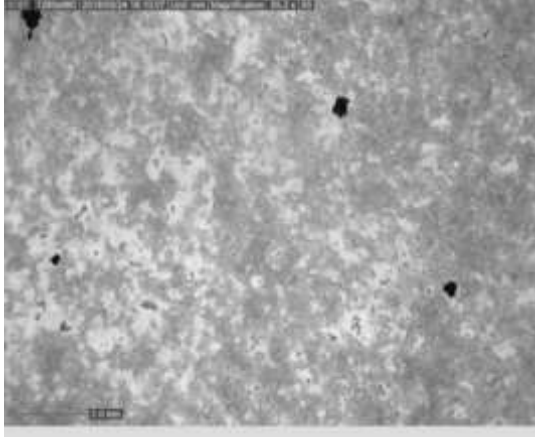


(a)

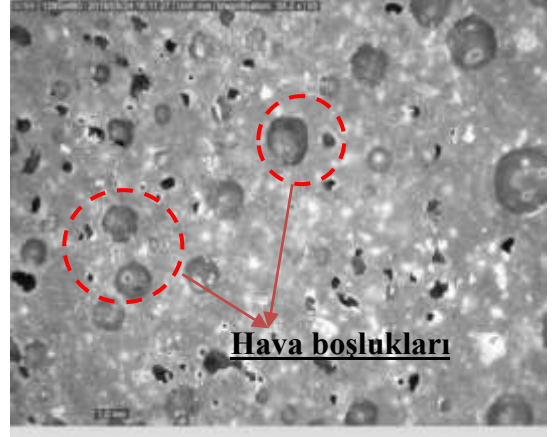


(b)

Şekil 4.12. 200 çevrim sonrası mikroskobik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen UK numunesi; (b) HSK içeren UK-HSK numunesi

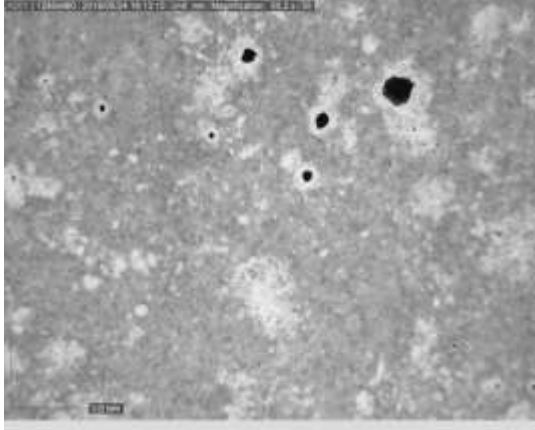


(a)



(b)

Şekil 4.13. 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen SD numunesi; (b) HSK içeren SD-HSK numunesi



(a)



(b)

Şekil 4.14. 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüler (1280x960 Unit: mm büyütme: 55.2x55), (a) HSK içermeyen K-UK-SD numunesi; (b) HSK içeren K-UK-SD-HSK numunesi

5. SONUÇ

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Mineral katkı içeren hamur karışımlarının Marsh Hunisi akış süreleri UK ikameli karışımda yüksek değerler gösterirken, SD içeren karışımlarda oldukça düşük değerlerde gözlemlenmiştir. Tüm karışımlarda su azaltıcı katkının doygunluk noktası su azaltıcı katkı/çimento oranının %0,75'i olduğu durumda gerçekleşmiştir. Mini yayılma değerlerinde beklenildiği üzere bir artış gözlemlenmiş ve kullanılan su azaltıcı katkı ile bir uyumsuzluk söz konusu olmamıştır.

Mineral katkı ve hava sürükleyici katkı (HSK) içeren çimento hamurunda, çimento yerine %30 oranında uçucu kül ikame edilmesiyle karışımların Marsh hunisi akış süresi artmıştır. Su azaltıcı katkı kullanım oranının artışıyla karışımların mini-çökme değeri artmıştır. Belli bir kullanım alanının oranının üstünde su azaltıcı katkı ilavesiyle mini-çökme değeri ciddi mertebede etkilenmemiştir. Uçucu kül içeren hamur karışımı mini-çökme davranışı açısından en düşük performansı sergilemiştir. Mineral katkı kullanımı ve tipinden bağımsız olarak tüm karışımlarda su azaltıcı katkı doygunluk noktası katkı/çimento oranı %1'i olduğu durumda tespit edilmiştir.

Mineral katkıların tek başına ikamesi ile hazırlanan harç karışımlarının yayılma kaybı, kontrol karışımına kıyasla daha düşük tespit edilmiştir. Mineral katkıların bir arada kullanıldığı harç karışımında yüksek oranda yayılma kaybı görülmüştür. İnce malzeme miktarındaki artış ile birlikte karışımda kıvam kaybı yaşanmış, karışımın su ihtiyacı artmıştır.

Harç karışımlarında silis dumanı ve uçucu kül mineral katkılarının HSK ile birlikte kullanılması karışımların zamana bağlı yayılma davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir. Hava sürükleyici katkı kullanımı ile oluşan küresel ve düzenli boşlukların, karışımların taze halde işlenebilirliğine olumlu etkisinin olduğu ve kıvam kaybını da olumlu yönde etkilediği söylenebilir.

Mineral katkı kullanımı basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Nihai dayanımlar kontrol karışımına yakın değerler gösterirken, en başarılı sonuç %10 SD ikamesi ile hazırlanan numunelerden elde edilmiştir.

HSK ve mineral katkı içeren karışımlar erken yaşlarda kontrol karışımına kıyasla daha düşük dayanım gösterirken, 90 günün sonunda kontrol karışımından daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olmuşlardır. Uçucu küle kıyasla daha yüksek puzolanik aktivite indeksine sahip olan silis dumanının kullanıldığı SD-HSK karışımı basınç dayanımı açısından en başarılı performansı gösteren karışım olmuştur.

Kontrol karışımına kıyasla, mineral katkılı harçların su emme oranlarında bir azalma söz konusudur. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD karışımı su emme performansı açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım kontrol karışımına kıyasla %42 daha geçirimsiz olmuştur.

HSK içeren harç karışımlarının 90 günlük su emme değerleri, mineral katkı tipinden bağımsız olarak, kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Bu bağlamda en başarılı sonuç, uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD-HSK karışımında gözlemlenmiştir. Söz konusu karışım, kontrol karışımına kıyasla %29 daha düşük su emme özelliği göstermiştir.

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak yalnızca Portland çimentosunun kullanıldığı kontrol (K) serisi, donma-çözülme etkisine karşı en başarısız seri olarak belirlenmiştir. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD serisi, 200 çevrim sonunda %10 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır. Mineral katkı kullanımı ile birlikte karışımların donma-çözülme olayına karşı gösterdikleri direnç artmıştır. Bu bağlamda, diğer mineral katkılı serilere kıyasla üçlü bağlayıcı sisteme sahip olan K-UK-SD serisinde bulunan toplam ince malzeme miktarının artışıyla birlikte, karışımların boşluk oranı ve geçirimsizliği azalmış, bunun yanı sıra meydana gelen kimyasal tepkimeler sonucunda oluşan yeni CSH'lar sayesinde daha dayanıklı numuneler elde edilmiştir.

HSK içeren harç karışımlarının donma-çözülme çevrim sayısının artmasıyla birlikte basınç dayanım değerleri azalmıştır. 200 çevrim sonunda en fazla basınç dayanım kaybı %16 oranı ile Kontrol serisinde görülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD-HSK serisi donma-çözülme çevrimlerine karşı en başarılı performansa sahip karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım 200 çevrim sonunda %8 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır.

Mineral katkıların puzolonik özelliğinin yanı sıra karışımlarda ince malzeme miktarını artırarak boşluk hacmini azalttığı ve buna bağlı olarak karışımların durabilite performanslarını artırdığı görülmüştür. Hava sürükleyici katkı kullanımı ile beklenildiği gibi, tüm karışımların donma-çözülme direncinde artışlar tespit edilmiştir. Mineral katkıların bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı sisteme sahip olan karışımın, donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanım kaybı, mineral katkıların tek başına ikamesi ile elde edilen ikili bağlayıcı sisteme sahip olan karışımların çevrim sonrası basınç dayanım kayıplarından daha az olmuştur.

Öneriler

- Farklı kimyasal özelliklere sahip HSK'lar kullanılarak katkıların etkinliği araştırılabilir.
- HSK'ların karışıma eklenme yöntemleri hakkında çalışmalar yapılabilir.
- Küresel yapılı mineral katkıların kullanıldığı karışımlarda, HSK moleküllerinin sistem içerisindeki dağılımını gözlemlemek üzere AVA (air void analyzer) cihazı ile ölçümler yapılabilir.
- Mineral katkı ve HSK kullanılarak hazırlanan beton karışımlarının donma-çözülme direnci araştırılabilir.
- Basınç dayanım kayıplarının belirlenmesinin yanı sıra, karışımların çevrim sonrası ağırlık kayıpları belirlenerek, UPV (ultrases geçiş hızı) deneyi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 226. 1994.** Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Constituent in Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, IR-1 to 226 IR-15, Part 1: 226.
- ACI 306R-88, 1994.** Cold Weather Concreting. ACI Manual of Concrete Practice, Part2
- Ahari, S.R., Erdem, K.T., Ramyar, K. 2015.** Time-dependent rheological characteristics of self-consolidating concrete containing various mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 30 July, 88: 134-142.
- Aİtcin, P.C., Laplante, P. 1990.** Long-Term Compressive Strength of Silica Fume Concrete. *J. Materials in Civil Engineering*, 3(3): 164-170.
- Aİtcin, P.C. 2004.** High Performance Concrete. E&FN SPON, New York.
- Akçaözoğlu, K. 2007.** Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı Ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi. *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Akman, S. 1999.** Role of Admixtures on the Properties of Fresh High Performance Concrete. RILEM Symposium, Mexico.
- Anonim 2003.** ACAA, Fly Ash Facts for Highway Engineers. Federal Highway Administration.
- Anonim 2008.** TUIK, Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri. Haber Bülteni Sayı:30.
- Aquino, W. 2002.** Long Term Performance of Seismically Rehabilitated Corrosion Damaged Columns. *PhD Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- ASTM C 618. 2000.** Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standart, No. 04.02
- ASTM C 618-94a. 1994.** Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use a mineral admixtures in Portland cement concrete. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C109.** Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM C1437.** Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
- ASTM C642-13. 2013.** Standard Test Method for Density. Absorption and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666-97. 1998.** Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standards.
- Ataş, Z. 2013.** Hava Sürükleyici ve Lif Katkısı İçeren Çimento Harçlarının Donma-Çözülme Etkisi Altında Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gümüşhane.
- Baker, M. 1984.** Evaluation on the utilization options, combustion by products utilization manual. EPRI report no. CS-3122.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. 2002.** Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). DEÜ Müh. Fak., Yayın No: 298, İzmir.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, Y., M., Topal, A. ve Öztürk, A. U. 2012.** Beton. D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Baradan, B., Aydın, S. 2013.** Betonun Durabilitesi. *Hazır Beton Dergisi*, Kasım-Aralık, 54-68.

- Basheer, L., Kropp, J., Cleland, D.J. 2001.** Assessment of The Durability of Concrete From Its Permeation Properties: a Review. *Construction and Building Materials*, 15(2-3): 93-103.
- Camposagrado, Gabriel R. 2006.** An Investigation on the Cause and Effect of Air-Void Coalescence in Air-Entrained Concrete Mixes. R&D Serial No. 2624: 136, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- Chandra, S., Björnström, J. 2002.** Influence of Cement and Superplasticizer Type and Dosage on the Fluidity of Cement Mortars-Part I. *Cement and Concrete Research*, 32: 1605-1611.
- Collepardi, M. 2005.** Admixtures-Enhancing Concrete Performance. 6th Int. Congress on Global Construction and Ultimate Concrete Opportunities. pp120-211, Dundee.
- Cordon, A.W. 1966.** Freezing and thawing of concrete: mechanisms and control. American Concrete Institute, Michigan.
- Çil, İ. 2000.** Yeni Kuşak Hiperakışkanlaştırıcı Beton Katkıları. *YKS Vizyon Dergisi*, SKW-MBT, Mart-Nisan-Mayıs, 2: 32-35.
- Delikurt, B.C., Sevim, U.K. 2015.** Sugözü Uçucu Külünün Betonun Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1): 47-58.
- Detwiler, R.J., Dalglish, B.J., Williamson, R.B. 1989.** Assessing the durability of concrete in freezing and thawing. *ACI Materials Journal*, 86: 29-35.
- Dinçer, R., Çağatay, İ.H. 2004.** Uçucu Kül Katkılı Betonların Mekanik Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2): 235-246.
- Dodson, V. 1990** Concrete admixtures. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Engin, Y. 2015** Yüksek Fırın Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Çimento. <http://www.betonvecimento.com/> - (Erişim Tarihi: 20.06.2019).
- Erdoğan, T.Y. 2003.** Beton. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayını, Ankara.
- Erdoğan, T.Y. 2010.** Beton. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayını, Ankara.
- Gao, X.F., Lo, Y.T. ve Tam C.M. 2002.** Investigation of micro-cracks and microstructure of high performance lightweight aggregate concrete. *Building and Environment*, 37: 485-489.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, S.M., Demir, İ. 2008.** Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, ANS Kampüsü Afyonkarahisar, Türkiye, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2: 85-94.
- Güçlüer, K., Ünal, O. 2010.** Uçucu Kül İçeriğinin Beton Basınç Dayanımı ve Geçirimsizliği Üzerine Etkisinin Araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1): 11-18.
- Hassan, K.E., Cabrera, J.G., Maliche, R.S. 2000.** The Effect of Mineral Admixtures on the Properties of High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 22: 267-271.
- Jahren, P. 1993.** Use of Silica Fume in Concrete. ACI SP-79. 1, pp625-642.
- Kantro, DL. 1980.** Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test, *Cement. Concrete and Aggregates* 1980, 2: 95-02.
- Khatib, J.M. and Mangat, P.S. 1999.** Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 21: 431-437.
- Khayat, K.H., Aitcin, P. C. 1992.** Silica Fume in Concrete -An Overview. ACI SP-132. 2, 835-872.

- Kosmatka, S.,H., Kerkhoff, B., Panarese, W.,C. 2002.** Design and control of concrete mixtures. 14th ed., Portland Cement Association, Stokie, Illinois.
- Kordi, E.A., Machaka, M. 2014.** Fly ash, slag, silica fume and natural pozzolans. <https://www.slideshare.net/Khawwam/3-fly-ash-slag-silica-fume-and-natural-pozzolans> (Erişim Tarihi: 20.06.2019).
- Lane, R.O., Best, J.F. 1982.** Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete. *Concrete International*, 4(7): 81–92.
- Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G.I., Ramyar, K. 2014** Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70: 17-25.
- Mardani-Aghabaglou, A., Son, A. E., Felekoğlu, B., Ramyar, K. (2017b).** Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. *Journal of Green Building*, 12(1): 142-167.
- Mardani-Aghabaglou, A., Boyacı, O. C., Hosseinnézhad, H., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. 2016.** Effect of gypsum type on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture. *Cement and Concrete Composites*, 68: 15-26.
- Mather, B. 2004.** Concrete Durability. *Cement and Concrete Composites*, 26: 3-4.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. 1993.** Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Second Edition, 245s, McGraw-Hill, ABD.
- Mehta, P.K. 1986.** Concrete-Structure, Properties, and Materials. Prentice-Hall, New Jersey.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 2010.** Concrete: Microstructure, Properties, And Materials. 3th ed. McGraw- Hill.
- Myers, D. 2006.** Surfactant Science and Thecnology. (3rd ed.) Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Naik, T.R., Singh, S.S. 1997.** Influence of fly ash on the setting and hardening characteristics of concrete systems. *ACI Material Journal*, 94: 355-360.
- Neville, A.M. 1995.** Properties of Concrete. Longman Scientific and Technical.
- Neville A. M. 1997.** Properties of Concrete. John Wiley & Sons Inc., London, pp844, ISBN 0-582-23070-5.
- Neville, A. 2001.** Su ve beton: bir sevgi nefret ilişkisi. Teknik Not, Çimento ve Beton Dünyası, TÇMB, Ocak-Şubat, 6(29): 35-43.
- Neville, A.M., Brooks, J.J. 1987.** Concrete Technology. Longman Scientific and Technical. pp155.
- Özturan, T. 1993.** Uluslararası IV. Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi. Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu 18-19 Kasım 1993, Bildiriler Kitabı, 57-78.
- Özyıldırım., Ç. 2007.** Hava Sürükleyici Katkıların Beton Dayanıklılığındaki Yeri. 2. Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara.
- Pandey, S.P., Sharma, R.L. 2000.** The Influence of Mineral Additives on the Strength and Porosity of OPC Mortar. *Cement and Concrete Research*, 30: 19-23.
- Pera, J. 2001.** Metakaolin and calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, 23(6): 441-520.
- Pigeon, M., Pleau, R. 1995.** Durability of Concrete In Cold Climates. E&FN Spon, pp244, ISBN 0-419-19260-3.

- Powders, T. C. 1945.** A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *ACI*, 242-272.
- Powders, T. C., Anel Helmuth R.A. 1953.** Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Pastes During Freezing Proc., Highway Research Board, 285-297.
- Powders, T.C., Brownyard, T.L. 1947.** Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *ACI*.
- Puthipad, N., Ouchi, M., & Attachaiyawuth, A. 2018.** Effects of fly ash, mixing procedure and type of air-entraining agent on coalescence of entrained air bubbles in mortar of self-compacting concrete at fresh state. *Construction and Building Materials*, 180: 437-444.
- Ramachandran, V.S., Malhotra, M. 1984.** Concrete admixtures handbook-part7 superplasticizers. Noyes publications, 462-463.
- RAO, G.A. 2003.** Investigations on The Performance of Silica Fume-Incorporated Cement Pastes and Mortars. *Cement and Concrete Research* 33: 1765-1770.
- Saran, A.G. 2007.** Ögütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Durabilite Özelliklerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Savaş, Z.B. 1999.** Effects of microstructure on durability of concrete. *PhD Thesis*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Sellers, F.R. 2002.** Air Change in Hydraulic concrete due to pumping. *Master's Thesis*, The University of Wyoming, Wyoming.
- Shang, H. S., Song, Y.P. 2008.** Behavior of air-entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze–thaw cycles. *Cement & Concrete Composites*, 854-860.
- Shon, C., Abdigaliyev A., Bagitova S., Chung, C., Kim, D. 2018.** Determination of air-void system and modified frost resistance number for freeze-thaw resistance evaluation of ternary blended concrete made of ordinary Portland Cement/silica fume/class F fly ash. *Cold Regions Science and Technology*, 155: 127-136.
- Snyder, K.A. 1998.** A numerical test of air void spacing equations. *Advanced Cement Based Materials*, 8: 28-44.
- Sommerville G. 2000.** A Holistic Approach To Structural Durability Design. Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century, Eve FN Spon, 41-56, ISBN 0-419-25060-3.
- Şahin, Y. 2013.** Hava Sürükleyici Katkıların Karakterizasyonu ve Deney Koşullarının Betonun Donma-Çözölme Hasarına Etkisi. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Tanyildizi, H. 2016.** The investigation of microstructure and strength properties of lightweight mortar containing mineral admixture exposed to sulfate attack, *Measurement*, 77(January): 143-154.
- Taşdemir, C. 2003.** Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33: 1637–1642.
- Tautanji, A. H., Bayasi, Z. 1999.** Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (4): 497-501.
- Tokyay, M. 1993.** Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi). Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, Kasım.
- Tokyay, M., Erdoğdu, K. 1993.** Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB, Ankara

- Tokyay M., Erdoğan K., 1998.** Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB ARGE/ Y 98.3.
- Tola, Y. 2000.** Farklı çimentolarla üretilmiş betonlarda donam-çözülme ve sülfat etkisi. *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M. 2008.** Silis Dumanının Betonda Mekanik Çatlak Oluşumlarına Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2): 17-26.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B. 2007.** Metakaolin ve silika dumanı kullanımının çimento harcının mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri. 3rd International Symposium on Sustainability in Cement and Concrete, İstanbul.
- TS 1248. 2107.** Betonun hazırlanması, dökümü ve bakım kuralları- Anormal hava şartlarında.
- TS EN 1097-6. 2013.** Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 196-1. 2016.** Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 197-1. 2012.** Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- TS EN 934-2. 2002.** Kimyasal Katkılar-Beton Harç ve Şerbeti İçin-Bölüm 2: Beton Katkıları. TSE, Ankara.
- Vu, D.D. 2002.** Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete. Delft University Press, Netherlands.
- Yalçınkaya, Ç. 2009.** Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonun Mekanik, Durabilite ve Mikron Yapı Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı, İzmir.
- Yang, Z. 2004.** Assessing Cumulative Damage in Concrete and Quantifying Its Influence On Life Cycle Performance Modeling. *PhD Thesis*, Purdue University.
- Yeğin, Y. 2009.** Donma-Çözülme Hasarına Hafif Agreganın, Hava Sürükleyici Katkının ve Donma-Çözülme Yönteminin Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, AÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- Yeğınobalı, A. 2003.** Silis Dumanı Ve Çimento İle Betonda Kullanımı. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Yeğınobalı, A. 2009.** Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı. TÇMB, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ece GEVEN
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara – 28/01/1992
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lisans : Ömer Halisdemir Üni., İnşaat Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üni., İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemeleri

İletişim (e-posta) : ecegeven@gmail.com

Yayınları :

Mardani-Aghabaglou, A., Kaptı, T., Özen, S., Altun, M.G., Geven, E., Nematzadeh, A., Öztürk, U.B. 2017. Polikarboksilat-Esaslı Su Azaltıcı Katkinin Anyonik Monomer Değişiminin Çimento Hamuru Ve Harç Karışımlarının Taze Hal Özelliklerine Etkisi. 5. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara.

Mardani-Aghabaglou, A., Geven, E., Özen, S., Yılmaz, G. 2018. Mineral Katkı Kullanımının Hava Sürükleyici Katkı İçeren Çimento Hamuru Karışımlarının Marsh Hunisi Akış Süresi ve Mini-Çökme Değerlerine Etkisi, International Congress on Engineering and Architecture (ENAR), Alanya, Turkey.

Mardani-Aghabaglou, A., Geven, E., Nematzadeh, A. 2019. Effect of Utilization of Different Type of Mineral Admixture on Fresh and Hardened Properties of Cementitious Systems. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2): 213-223.

Nematzadeh, A., Geven, E., Özen, S., İlhan, M. 2019 Effect of Different Permeability Reducing Admixture on Flowability Performance of Different Type of Mineral Admixture-Containing Mortar Mixtures. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37(2): 625-640.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

| | |
|--------------------------------|--|
| Yazar Adı Soyadı | ECE GEVEN |
| Tez Adı | Hava Sürükleyici ve Mineral Katkı Kullanımının Çimentolu Sistemlerin Geçirgenlik Özelliklerine ve Donma-Çözülme Direncine Etkisi |
| Enstitü | Fen Bilimleri Enstitüsü |
| Anabilim Dalı | İnşaat Mühendisliği |
| Tez Türü | Yüksek Lisans |
| Tez Danışman(lar)ı | Doç. Dr. Ali MARDANI AGHABAGLOU |
| Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni | <input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input checked="" type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum |
| Yayımlama izni | <input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum |

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 07. 08. 2019

İmza :

