



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KARBONATLAŞMANIN VE SÜLFATLARIN
SİLİS DUMANI VE MİKRO KATKILI
BETONLARDA ETKİSİ

Nematullah RAHİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Nematullah Rahimi tarafından hazırlanan “**Karbonatlaşmanın ve Sülfatların Silis Dumanı ve Mikro Katkılı Betonlarda Etkisi**” adlı tez çalışması 26/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Konya Teknik Üniversitesi Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr.Öğr. Üye. Sadık Alper YILDIZEL

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Üye

Dr. Öğr. Üye. Merve SOĞANCIOĞLU

İmza

.....
.....
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA
LEE Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 18201096 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Nematullah RAHİMİ

Tarih:

28.06.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KARBONATLAŞMANIN VE SÜLFATLARIN SİLİS DUMANI VE MİKRO KATKILI BETONLARDA ETKİSİ

Nematullah RAHİMİ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Yrd. Danışman: Doç. Dr. Esra YEL

2019, 80 Sayfa

Jüri

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Dr. Öğr. Üye. Sadık Alper YILDIZEL
Dr. Öğr. Üye. Merve SOĞANCIOĞLU

Bu çalışmada, ince taneli çimento (DMFC-800), mikro fiber ve silis dumanı kullanılarak üretilen betonlarda sülfat ve karbonatlaşmanın etkisi araştırılmıştır. Silis dumanı DMFC-800 ile kütlece %0, %5, %10 ve %15 oranlarında ikame edilmiştir. Mikro fiber katkısı ise, hacimce her bir metre küp için 600 gr kullanılmıştır. Sekiz grup beton karışımı C25/30 beton sınıfı baz alınarak 4 grup mikro fiberli ve 4 grup mikro fibersiz olmak üzere 150x150x150 mm ebatlı küp kalıplarda dökülmüştür. Karbonatlaşma deneyinde hızlandırılmış karbonatlaşma test yöntemi uygulanmıştır. Bunun için beton numuneler 28 ve 56 gün yoğunlaştırılmış CO₂ gazı ortamında bekletilmiştir. Sülfat etkisi deneyi için beton numuneler 28 ve 90 gün süre ile %2 sodyum sülfat ve %2 magnezyum sülfat konsantrasyonlarındaki dış sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Söz konusu kür yaşlarında numuneler kür ortamlarından çıkartılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre silis dumanı ve mikro fiber karbonatlaşmanın azaltılmasında olumlu etki göstermiştir. En yüksek karbonatlaşma direnci silis dumanının %10 ve %15 oranlarında görülürken, en az karbonatlaşma direnci ise silis dumanı ve mikro fiber içermeyen betonlarda görülmüştür. Silis dumanı ve mikro fiber sodyum sülfat atağına karşı beton direncini artırmıştır. 28 gün sodyum sülfat etkisinde kalan betonların en yüksek basınç dayanımı mikro fiber ve %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren betonlarda, en az basınç dayanımı ise mikro fiber ve silis dumanı içermeyen betonlarda görülmüştür. Fakat silis dumanının oranı arttıkça magnezyum sülfat atağına karşı betonun direnci azalmıştır. 28 gün boyunca magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonların en yüksek basınç dayanımı, mikro fiber içeren ve silis dumanı içermeyen betonda görülürken, en az basınç dayanımı mikro fiber ve %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren betonlarda görülmüştür. 90 gün sülfat çözeltilerinde bekletilen tüm beton grupları 28 gün sülfat çözeltisinde bekletilen betonlara oranla basınç dayanımı bir miktar artma göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: DMFC, karbonatlaşma, mikro fiber, magnezyum sülfat, sodyum sülfat, sülfatlar, silis dumanı

ABSTRACT

MS. THESIS

EFFECT OF SILICA FUME AND MICRO FIBER ADDITIVES ON SULFATES AND CARBONATION PROCESS IN CONCRETE

Nematullah RAHİMİ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Co. Advisor: Assoc. Prof. Dr. Esra YEL**

2019, 80 Pages

Jury

**Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Assist. Prof. Dr. Sadık Alper YILDIZEL
Assist. Prof. Dr. Merve SOĞANCIOĞLU**

In this study, the effect of carbonation and sulfates on micro-fine cement called DMFC-800 cement, micro fibers-added and silica fume-added concrete was investigated. Silica fume was substituted with 0%, 5%, 10% and 15% by mass of DMFC-800 and 600 grams per cubic meter micro fiber additive was used. Eight groups concrete mixture of based on C25/30 class concrete were poured in 150x150x150 mm cube molds with 4 groups of micro fiber and 4 groups of non-micro fiber additive. Accelerated carbonation test method was applied in carbonation experiment. For this purpose, concrete samples were stored in condensed CO₂ gas for 28 and 56 days. The concrete samples were subjected to the effect of outer sulfate at concentrations of 2% sodium sulfate and 2% magnesium sulfate for 28 and 90 days. After the curing ages, the samples were removed from the curing environment and experiments were carried out. According to the results of the experiment, silica fume and micro fiber additive had a positive effect on the reduction of carbonation. Carbonation resistance was found in the samples with a maximum of 10% and 15% silica fume, while the least carbonation resistance was observed in the samples without silica fume and micro fiber additive. Silica fume and micro fiber increased the concrete resistance against sodium sulfate attack. The maximum compressive strength of the concretes, which were exposed to sodium sulfate concentration for 28 days, was observed in concretes containing micro fiber and 10%, 15% of silica fume and the least compressive strength was seen in concretes without micro fiber and silica fume. However, as the ratio of silica fume increased, the resistance of the concrete against magnesium sulfate attack decreased. The highest compressive strength of the concretes, which were kept in 28 days magnesium sulfate concentration, was observed in the concrete which contains micro fiber and free of silica fume and the least compressive strength was observed in concrete which containing micro fiber and 10%, 15% of silica fume. The compressive strength of all concrete groups, which were kept in the sulfate solutions for 90 days, increased slightly compared to 28 days.

Keywords: DMFC, carbonation, micro fiber, magnesium sulfate, sodium sulfate, sulfates, silica fume

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi çalışmamda bana değerli bilgileri ile yol gösteren ve tecrübeleriyle katkıda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e ve Konya Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi, yardımcı danışmanım sayın Doç. Dr. Esra YEL hocama en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmada, maddi destek sağlayan Konya Teknik Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim (Proje No. 18201096).

Beton dökümünde bana gerekli ekipmanları sağlayan Sancak Hazır Beton A.Ş firmasına, özellikle bu konuda desteği olan değerli dostum Serkan ERDOĞAN'a ve çalışmalarım sırasında bana destek olan arkadaşlarıma özellikle dostluğunu esirgemeyen değerli arkadaşım Murat GÜNAYDIN'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman bana maddi ve manevi destek sağlayan her konuda yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nematullah RAHİMİ
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | ix |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | x |
| ÇİZELGELER LİSTESİ | xii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER..... | 3 |
| 2.1. Betonda Karbonatlaşma | 3 |
| 2.2. Karbonatlaşmanın Betona Sakıncaları | 9 |
| 2.3. Karbonatlaşmanın Betona Yararları | 10 |
| 2.4. Karbonatlaşmaya Etki Eden Beton Bileşenler | 10 |
| 2.4.1. Çimento..... | 10 |
| 2.4.2. Agregası..... | 11 |
| 2.4.3. Beton karışım suyu | 11 |
| 2.4.4. Ortam koşulları | 12 |
| 2.4.5. Betonda kullanılan katkıları | 13 |
| 2.5. Karbonatlaşma Miktarının Ölçülmesi..... | 13 |
| 2.6. Karbonatlaşma Gelişimini Azaltacak Önlemler | 14 |
| 2.6.1. Çimento bileşimi ve dozajı | 15 |
| 2.6.2. Su/çimento oranı | 15 |
| 2.6.3. Betonun kür süresi | 15 |
| 2.6.4. Beton rutubeti | 16 |
| 2.6.5. Mineral katkıları..... | 16 |
| 2.6.6. Basınç dayanımı..... | 16 |
| 2.6.7. Betonun kaplanması..... | 17 |
| 2.7. Betonda Sülfat Etkisi | 17 |
| 2.8. Sülfatların Betonda Yarattığı Zararlı Reaksiyonlar | 23 |
| 2.9. Sülfat Reaksiyonlarının Gelişimini Etkileyen Parametreler | 24 |
| 2.9.1. Sülfat içeriği..... | 24 |
| 2.9.2. Çimentonun yapısı | 25 |
| 2.9.3. Betonun geçirimsizliği | 25 |
| 2.9.4. Nem ortamı | 26 |
| 2.10. Sülfat Saldırısına Karşı Alınacak Önlemler | 26 |
| 2.11. Silis Dumanı | 28 |
| 2.11.1. Silis dumanının karbonatlaşmaya olan etkisi..... | 30 |
| 2.11.2. Silis dumanının sülfatlara karşı direnci | 31 |
| 2.11.3. Silis dumanının beton basınç dayanımına etkisi..... | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 33 |
| 3.1. Materyaller..... | 33 |
| 3.1.1. Agregâ özellikleri | 33 |
| 3.1.2. Çimento özellikleri | 36 |
| 3.1.3. Silis dumanı özellikleri | 36 |
| 3.1.4. Mikro fiber özellikleri..... | 36 |
| 3.1.5. Karışım suyu özellikleri..... | 37 |
| 3.1.6. Kimyasal katkı maddenin özellikleri | 38 |
| 3.2. Metod..... | 38 |
| 3.2.1. Beton karışımın hazırlanması ve beton üretimi | 38 |
| 3.2.2. Karbonatlaşma deneyi..... | 42 |
| 3.2.3. Sülfat etkisi deneyi..... | 44 |
| 3.2.4. Sülfat tayini..... | 46 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... | 47 |
| 4.1. Deney Sonuçları..... | 47 |
| 4.1.1. Karbonatlaşmanın deney sonuçları | 47 |
| 4.1.2. Sülfat etkisi deney sonuçları | 51 |
| 4.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... | 59 |
| 4.2.1. Karbonatlaşma deney sonuçlarının değerlendirilmesi..... | 59 |
| 4.2.2. Sülfat etkisi deney sonuçlarının değerlendirilmesi..... | 60 |
| 4.2.3. Sülfat analiz sonuçları ve değerlendirilmesi | 71 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 73 |
| 5.1. Sonuçlar | 73 |
| 5.2. Öneriler | 74 |
| KAYNAKLAR | 75 |
| ÖZGEÇMİŞ | 81 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|---------------------------------|--|
| °C | : Sıcaklık |
| A | : Betonun yüzey alanı (mm ²) |
| C ₃ A | : 3CaO.Al ₂ O ₃ |
| C ₃ S | : 3CaO.SiO ₂ |
| CO ₂ | : Karbondioksit |
| f _c | : Betonun basınç dayanımı(N/mm ²) |
| MgSO ₄ | : Magnezyum sülfat |
| Na ₂ SO ₄ | : Sodyum sülfat |
| Ort.f _c | : Betonun ortalama basınç dayanımı(N/mm ²) |
| P | : Kırılma yükü |
| S/Ç | : Su/çimento oranı |
| γ _c | : Beton karışımında kullanılan malzeme yoğunluğu |

Kısaltmalar

| | |
|-------|--|
| ACI | : American Concrete Institute |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials |
| CH | : Kalsiyum Hidroksit |
| C-S-H | : Hidrate Kalsiyum Silikat Jeli |
| DMFC | : DMAR Micro Fine Cement |
| M-S-H | : Magnezyum Silika Hidrate |
| RH | : Bağıl Nem (Relative Humidity) |
| SD | : Silis Dumanı |
| TS | : Türk Standartları |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Beton yüzeyine nüfuz eden karbondioksitin şematik gösterimi | 3 |
| Şekil 2.2. Karbonatlaşma nedeniyle pH'ın düşmesi | 4 |
| Şekil 2.3. Karbonatlaşma ölçüm sürecinin aşamaları: (a) phenolphtalein püskürtme (b) karbonatlaşma derinliğinin ölçümü | 14 |
| Şekil 2.4. Betonda sülfat etkisi ve geçirimsizlik arasındaki ilişki | 26 |
| Şekil 3.1. (0-4 mm) Kırma kum elek analizi grafiği..... | 34 |
| Şekil 3.2. (4-11.2 mm) I.nolu agrega elek analizi grafiği | 35 |
| Şekil 3.3. (11.2-22.4 mm) II.nolu agrega elek analizi grafiği..... | 35 |
| Şekil 3.4. Yapılan deneyde kullanılan agregalar: (a) 11.2-22.4 mm, II.nolu agrega (b) 4-11.2 mm, I.nolu agrega (c) 0-4 mm, kırma kum..... | 35 |
| Şekil 3.5. Mikro fiber görünümü | 37 |
| Şekil 3.6. Beton karışımının hazırlanması: (a) agrega tartımı (b) su tartımı (c) kullanılan beton mikseri (d) malzemelerin karıştırılması | 40 |
| Şekil 3.7. Betonun kalıplara yerleştirilmesi ve etiket yapıştırılması | 41 |
| Şekil 3.8. Betonun kalıptan çıkarılması | 41 |
| Şekil 3.9. kalıptan çıkarılan betonlar | 41 |
| Şekil 3.10. Hızlandırılmış karbonatlaşma deney sistemi: (a) hızlandırılmış karbonatlaşma deneyin gerçek görünümü (b) hızlandırılmış karbonatlaşma deneyin şematik gösterimi | 43 |
| Şekil 3.11. Nem kazanına ve fana bağlayan termostat | 43 |
| Şekil 3.12. Sülfat çözeltilerin hazırlanması: (a) sülfat tuzunun tartımı (b) çözeltinin karıştırılması ve sülfat tuzunun çözünmesi (c) magnezyum sülfat çözeltisi (d) sodyum sülfat çözeltisi | 45 |
| Şekil 3.13. Sodyum sülfat kür deposu | 45 |
| Şekil 3.14. Sülfat çözeltilerden alınan numuneler | 46 |
| Şekil 3.15. Sülfat analizi: (a) spektrofotometre cihazı (b) cihazın ekran görüntüsü | 46 |
| Şekil 4.1. Beton numunelerin kesilmesi: (a) beton kesme makinesi (b) iki eşit parçaya bölünen beton numuneleri | 47 |
| Şekil 4.2. Phenolphtalein püskürtülmesi ve karbonatlaşma miktarının ölçülmesi: (a) karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış bölgenin şematik gösterimi (b) beton numunesi üzerinde gösterilen karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış bölgenin ayırımı (c) köşeden karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi (d) ortadan karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi | 48 |
| Şekil 4.3. Karbonatlaşmış beton numuneleri | 48 |
| Şekil 4.4. 28 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği | 50 |
| Şekil 4.5. 56 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği | 51 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.6. Sülfat etkisi ile bozulma oluşan betonlar: (a) sülfat çözeltisinden çıkarılan beton numuneleri (b, c ve d) sülfat etkisi ile beton yüzeyinde oluşan beyaz lekeler ve köşelerinde meydana gelen hafif dökülmeler | 52 |
| Şekil 4.7. Betonun basınç dayanımı deneyi: (a) betonun deney cihazına yerleştirilmesi (b) betona basınç uygulandıktan sonraki hali | 52 |
| Şekil 4.8. Kırılmış beton numuneleri: (a) beton basınç uygulandıktan sonra çaprazdan çatlama (b) beton kırıldıktan sonra yüzeyden dökülme (c ve d) betonların diğer boyutlardan alınan deformasyon şekilleri | 53 |
| Şekil 4.9. 28 gün normal suda bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi..... | 54 |
| Şekil 4.10. 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi | 55 |
| Şekil 4.11. 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi | 56 |
| Şekil 4.12. 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi | 57 |
| Şekil 4.13. 90 gün magnezyum çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi | 58 |
| Şekil 4.14. 28 ve 56 günlük numunelerin karbonatlaşma değişim grafiği | 60 |
| Şekil 4.15. 28 günlük sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları | 63 |
| Şekil 4.16. 28 günlük magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları | 64 |
| Şekil 4.17. 28 günlük sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları | 65 |
| Şekil 4.18. 90 günlük sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları | 66 |
| Şekil 4.19. 90 günlük magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları | 67 |
| Şekil 4.20. 90 günlük sodyum sülfat-magnezyum sülfat-şahit betonların basınç dayanımları | 68 |
| Şekil 4.21. 28 ve 90 gün sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisinde kür edilen betonların basınç dayanımları | 69 |
| Şekil 4.22. 28 ve 90 gün magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisinde kür edilen betonların basınç dayanımları | 70 |
| Şekil 4.23. 28 ve 90 gün sülfat çözeltilerinde kür edilen betonların basınç dayanımları | 71 |
| Şekil 4.24. Sülfat analizi grafiği | 72 |

ÇİZELGELER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 2.1. Beton için zararlı kimyasal etki yapan iyon ve ortamların sınır değerleri . | 12 |
| Çizelge 2.2. ACI standardına göre sülfat etki derecesinin sınıflandırılması ve bu ortamdaki betonun kullanım şartları | 27 |
| Çizelge 2.3. TS EN 206’da betonun zararlı kimyasal etki durumuna göre sınır değerler | 27 |
| Çizelge 3.1. (0-4 mm) kırma kum elek analizi | 33 |
| Çizelge 3. 2. (4-11.2 mm) I.nolu agrega elek analizi..... | 34 |
| Çizelge 3. 3. (11.2-22.4 mm) II.nolu agrega elek analizi | 34 |
| Çizelge 3. 4. İnce taneli çimentonun (DMFC-800) fiziksel özellikleri | 36 |
| Çizelge 3. 5. Çalışmada kullanılan silis dumanının özellikleri..... | 36 |
| Çizelge 3. 6. Mikro fiberin karakteristik özellikleri | 37 |
| Çizelge 3. 7. Beton karışım suyunun özellikleri..... | 37 |
| Çizelge 3. 8. Conslumper 4365, hiper akışkanlaştırıcı katkısının özellikleri | 38 |
| Çizelge 3. 9. Beton numunelerin kodlanması | 38 |
| Çizelge 3. 10. 1m ³ beton için karışım miktarları | 39 |
| Çizelge 3. 11. 22 dm ³ beton için karışım miktarları | 39 |
| Çizelge 3. 12. 1m ³ ’te C25/30 beton sınıfı için karışım miktarları | 42 |
| Çizelge 3. 13. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için üretilen numuneler..... | 43 |
| Çizelge 3. 14. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisi deneyi için üretilen numuneler | 44 |
| Çizelge 4. 1. 28 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği deney sonuçları..... | 49 |
| Çizelge 4. 2. 56 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği deney sonuçları..... | 49 |
| Çizelge 4. 3. Beton referans numunelerin basınç dayanımı sonuçları | 54 |
| Çizelge 4. 4. 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları..... | 55 |
| Çizelge 4. 5. 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları | 56 |
| Çizelge 4. 6. 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları..... | 57 |
| Çizelge 4. 7. 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları | 58 |
| Çizelge 4. 8. Karbonatlaşma derinliklerinin değişim miktarı | 59 |
| Çizelge 4. 9. 28 günlük şahit numunelerin silis dumanının oran değişimine göre basınç dayanımı % değişimi | 62 |
| Çizelge 4. 10. 28 gün sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi | 62 |

| | |
|---|----|
| Çizelge 4. 11. 28 gün magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi | 64 |
| Çizelge 4. 12. Referans betonlara göre 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi | 66 |
| Çizelge 4. 13. Referans betonlara göre 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi | 67 |
| Çizelge 4. 14. 28 günlük sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisinde bekletilen betonlara göre 90 gün sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi | 68 |
| Çizelge 4. 15. 28 günlük magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletilen betonlara göre 90 gün magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi..... | 69 |
| Çizelge 4. 16. Sülfat tayini sonuçları | 72 |

1. GİRİŞ

Beton, ilk kullanımından bu yana en çok kullanılan yapı malzemesi olarak bilinmektedir. Betonun günümüzde çok tercih edilmesinin sebebi, ekonomik olması, dayanıklı olması, her yerde üretilebilir olması ve şekil verilebilme kolaylığına sahip olmasıdır. Etrafımıza baktığımızda, tüm yapılar, sığınaklar, köprüler, yollar, tüneller gibi hayat şartlarımızı kolaylaştıran ve insanları barındırmak amacıyla inşa edilen yapıların büyük çoğunluğu beton kullanılarak yapılmıştır.

Betonun bünyesinde zamanla hava koşullarından, sülfatlı, tuzlu ve asitli sulardan veya bazı kimyasal ve fiziksel tepkimelerden dolayı değişimler meydana gelmektedir. Bu olaylar betonun zaman içerisinde dayanıklılığını düşürmekte ve servis ömrünü azaltmaktadır (Zhang ve ark., 2018). Betonun içyapısında değişim yaratan bu olaylardan biri karbonatlaşmadır.

Karbonatlaşma; atmosferde mevcut olan karbondioksitin ve beton boşluklarında bulunan kalsiyum hidroksitin reaksiyonu neticesinde oluşan bir olaydır (Gönen, 2003). Karbonatlaşma ile ilgili hidrasyon ürünleri, esas olarak CH ($C=CaO$, $H=H_2O$) ve CSH ($C=CaO$, $H=H_2O$, $S=SiO_2$)'dir. Bu ürünler, alkali ortam oluşturarak donatının paslanmasını engeller. Fakat, atmosferdeki CO_2 betona nüfuz eder ve su ile reaksiyona girerek karbonik asiti oluşturur. Karbonik asit kirecin çözümünde etkili bir üründür (Morandea ve ark., 2014). Bu reaksiyon neticesinde, serbest kireç konsantrasyonu azalır ve betonun pH değeri 13.5'ten 9.5'a düşerek bazik özelliği zayıflar (Uwanakwa, 2016; Possan ve ark., 2017). Bu şekilde beton içerisinde bulunan donatılar korozyona maruz hale gelmektedir. Korozyon, betonarme yapılarda bozulmaların ana nedenlerinden biridir (Revert ve ark., 2018). Korozyon sonucu binalar ağır hasarlar olarak mekanik ve çevresel etkilere karşı daha hassas olmaktadır. Karbonatlaşmanın beton bünyesinde yer alması yavaş ilerleyen bir süreçtir. Her ne kadar karbonatlaşmanın kendisi de çeşitli durabilite problemlerine neden olsa da esas olarak karbonatlaşma sonucu donatının paslanması çok daha ciddi problemlere neden olmaktadır. Karbonatlaşma oluşabilmesi için ortamda CO_2 'in bulunması şarttır. Dolayısıyla ilk akla gelen durum, betona CO_2 'in difüzyonunu engellemektir. Bunun için karbonatlaşmaya önlem olarak, yüzeyi geçirimsiz bir beton üretmek, beton yüzeyini korumak amacı ile epoksi, reçine, siloksan ve akrilik gibi malzemeler veya karbonatlaşmaya karşı kimyasal ve mineral katkı maddeleri kullanmak gibi yollar izlenebilir.

Betona olumsuz etkileyen bir diğerk faktör sülfatlardır. Sülfat saldırısına uğrayan betonlar, sülfat ve çimento bileşimlerinin reaksiyonu neticesinde zamanla bozulma göstermektedir. Sülfat saldırısında oluşan etrenjit, alçı ve tomazit gibi ürünlerin betonun hacminde değışiklik yaparak betonun genişmesine, dağılmasına ve parçalanmasına sebep olur. Sülfat etkisinde kalmış beton, yüzeyinde beyaz lekeler oluşur. Bu etki köşe, birleşim yerinden ve daha hassas noktalardan başlayarak tüm kütleyle yayılır (Göktepe, 2008).

Beton bozulmalarının ana nedenlerinden biri, yeraltı suyu, toprak ve deniz suyu içinde bulunan zararlı kimyasallardır. Bulunan agresif kimyasallar arasında, sülfatların beton yapıların dayanıklılığını etkileyen en agresif iyonlar olduğu bilinmektedir (Zhao ve ark., 2018). Yeraltı sularında ve bazı killi topraklarda yüksek miktarlarda sülfat iyonları bulunmaktadır. Genel olarak sülfat saldırısına uğrayan betonlar, temel betonları, kanal kaplama betonları, istinat duvarı betonları, deniz iskele betonları ve beton borularıdır. Sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat şeklinde bulunan bu iyonlar, beton boşluklarına sızarak beton bünyesinde genişleme yaratmakta ve betondaki çimentonun bağlayıcılık değerini azaltarak betonu yıpratmaktadır.

Betonda sülfat saldırısına alınacak önlemler, beton geçirgenliğinin önlenmesi, çimentonun kimyasal bileşiminde bulunan C_3A ve $Ca(OH)_2$ miktarının sınırlandırılması, sülfata dayanıklı katkı maddelerin kullanılması, kaplama yoluyla betonun sülfata karşı kaplama ürünleri ile izole edilmesi şeklinde özetlenebilir.

Karbonatlaşmanın ve sülfat hücumunun önlenmesi için, başta beton geçirimsizliğinin sağlanması gerekmektedir. Betonun karbonatlaşmaya yatkınlığını azaltmak, sülfat kristalizasyon sıkıntısı oluşumunu engelleyebilir ve beton hasarını geciktirebilir (Liu ve ark., 2018). Beton geçirimli olduğu zaman havadaki CO_2 betonun içeresine kolayca nüfuz etmekte veya zemindeki ve yer altı sularındaki sülfatlar, sularla birlikte betonun içeresine kolayca sızabilmektedir. O nedenle, betonun geçirimliliğinin azaltılması, betona girecek sülfat miktarının azaltılmasını ve havadaki CO_2 'in difüzyonunun zorlaşmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, geçirimsizliğe olumlu etki oluşturacağı düşünülen ince taneli çimento, silis dumanı ve mikro fiber ile çeşitli kombinasyonlar elde edilerek üretilen betonlarda karbonatlaşma ve sülfat etkisi sonucu betonun direnci ve dayanıklılığını ne yönde etki edeceği ve bu iki probleme karşı gösterebilecekleri performansı araştırmaktır.

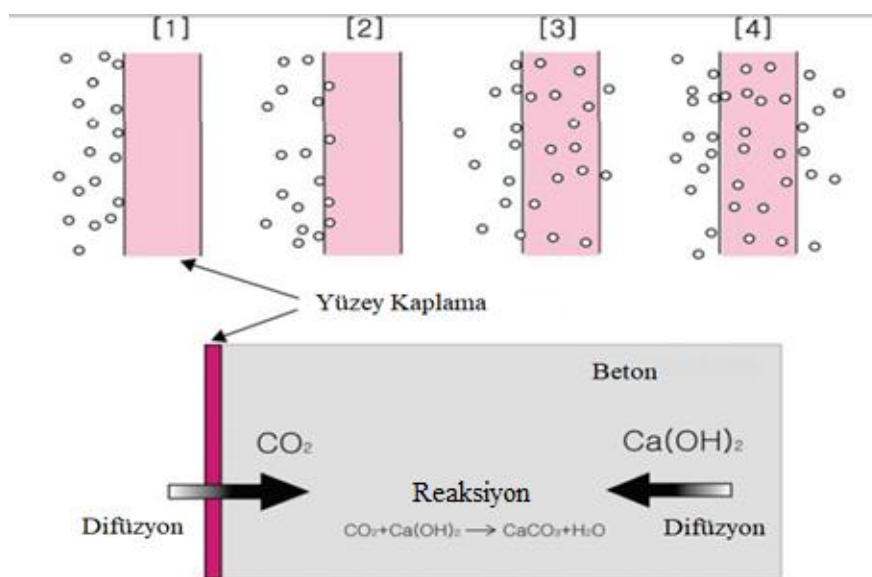
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER

Betonun dayanım ve dayanıklılığına olumsuz yönde etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörlerden en önemlileri karbonatlaşma ve sülfatların etkisidir. Karbonatlaşma olayında, havadaki karbondioksit gazı betonun içyapısında bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonatı oluşturur. Bunun sonucunda betonun alkali yapısı zayıflar ve pH=12,5'ten daha küçük bir değere düşerek donatı korozyona açık hale gelir. Sülfat ortamlarındaki betonlar ise, sülfat ve çimento bileşimlerinin reaksiyonu neticesinde zamanla bozulma gösterir ve betonun genişerek çatlamasına ve dağılmasına sebep olur. Her iki durumda betonun dayanımı ve dayanıklılığı düşmektedir.

2.1. Betonda Karbonatlaşma

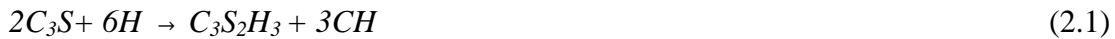
Betonda karbonatlaşma, havada bulunan karbondioksitin (CO_2) kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girmesi ve kalsiyum karbonatın (CaCO_3) oluşmasıdır (Park, 2008; Malami, 2014). Normal havada %0.03 oranda CO_2 gazı bulunmaktadır ki bu oranda bile karbonatlaşma gerçekleşebilir. Büyük kentlerde bu oran %0.3-1 gibi bir değere ulaşmakta olup sanayileşmiş kentlerde ise daha yüksektir (Özer, 2012).

Beton yüzeyine nüfuz eden karbondioksitin şematik gösterimi Şekil 2.1'de görülmektedir. Karbondioksit önce betonun yüzeyine temas etmekte [1], daha sonra çözünme oluşmakta [2] ve son olarak karbondioksit betonun içine tamamen nüfuz etmektedir [3,4] (Kara, 2013).

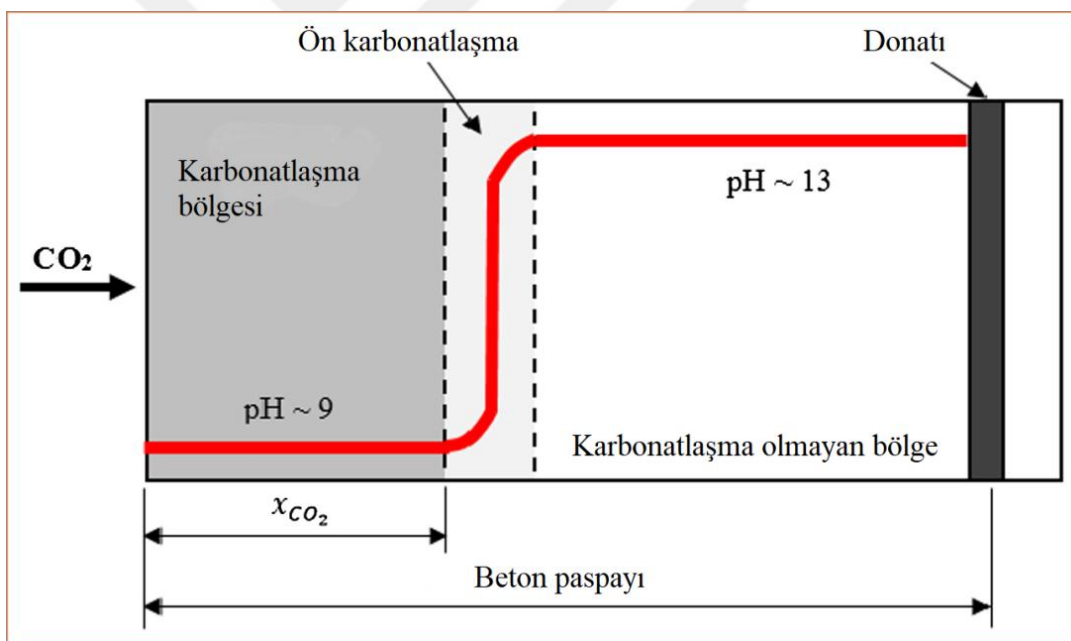


Şekil 2.1. Beton yüzeyine nüfuz eden karbondioksitin şematik gösterimi (Park, 2008)

Karbondiyoksit (CO_2) tek başına karbonatlaşmayı oluşturamaz. Ancak, su çimentonun ana ürünleri ile trikalsiyum silikat (C_3S) ve dikalsiyum silikat (C_2S) ile reaksiyona girerek önce kalsiyum hidroksiti daha sonra CO_2 difüzyonu ile karbonatlaşmayı oluşturur (Malami, 2014). Bu reaksiyonlar denklem (2.1-2.3)'te gösterilmektedir.



İlgili reaksiyon sonucu ortaya CaCO_3 çıkmaktadır. Böylece hidroksit iyonları nötrleşerek pH derecesini 9'a kadar düşürmektedir. Şekil 2.2'de karbonatlaşma neden ile beton kaplama derinliğinde pH değerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 2.2. Karbonatlaşma nedeniyle pH'nin düşmesi (Ta ve ark., 2016)

Ayrıca, belirli oranlarda CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 gibi bileşimlerinin her biri dış ortamda bulunan CO_2 gazı ile reaksiyona girdikleri zaman karbonatlaşmayı meydana getirirler. Sodyum ve potasyum gibi oksitler ayrı ayrı su ile reaksiyona girerek ilk sodyum ve potasyum hidroksit iyonlarını meydana getirir ve ardından atmosferde bulunan CO_2 ile birleşerek sodyum karbonat ve potasyum karbonatı oluştururlar. Daha sonra bu ürünler çimento içerisindeki serbest kireç ile birleşerek kalsiyum karbonatı

meydana getirirler (Morandean ve ark., 2014). Bu reaksiyonlar denklem (2.4-2.9)'da gösterilmektedir.



Karbonatlaşmayı belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Normal ortamda karbonatlaşma çok uzun süre içerisinde olduğu için deneylerde hızlandırılmış karbonatlaşma yöntemi tercih edilir. Hızlandırılmış karbonatlaşma yöntemi, betonun yoğun CO₂ ortamına maruz bırakılması esasına dayanır. Literatür çalışmalarında çoğunlukla hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Gönen (2003), tarafından yapılan çalışmada farklı nem ortamlarındaki beton örnekleri üzerinde karbonatlaşma gelişimi araştırılmıştır. Çalışmada hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği uygulanmıştır. Bunun için beton örnekler özel olarak tasarlanmış tankın içerisinde %35, %55 ve %80 bağıl nemde ve %40 karbondioksitli ortamda bekletilmiştir. Deney sonunda, en fazla karbonatlaşma miktarı %55 bağıl nemde görülürken, en az karbonatlaşma miktarı ise %35 nem ortamında gerçekleştirilmiştir (Gönen, 2003).

Subaşı ve Arslan (2008), tarafından yapılan bir deneyde farklı yüzey özellikleri olan karakavak, kontrplak, sarıçam ve çelik sac kalıpları kullanılarak betonun karbonatlaşma miktarına etkisi araştırılmıştır. Kontrplak kalıplardan bir kısmında drenaj kanal ve delikleri açılarak TB50+F613, SB30 ve BL20 geotekstilleri kalıp yüzey astarı olarak uygulanmıştır. Betonlar 28 gün sonra kalıplardan çıkarılıp, 6 yıl kadar normal hava şartlarına maruz bırakılmıştır. Yaş süresi bitiminde beton bloklardan karot numuneler alınarak karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Deney sonunda; en çok karbonatlaşma direnci, SB20 geotekstil astarlı kalıba dökülen betonda, en az karbonatlaşma direnci ise çelik sac yüzeyli kalıba dökülen betonda görülmüştür (Subaşı ve Arslan, 2008).

Özer (2012), tarafından yapılan çalışmada, çimento çeşitlerinin karbonatlaşmaya olan etkileri incelenmiştir. Bunun için 5 farklı çimento gurubu ve iki farklı katkı

maddesi, silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak toplam 8 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numuneler, farklı zaman periyodlarında (1, 3 ve 7 gün) %40 karbondioksitli ortama maruz bırakılmıştır. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan ve karbonatlaşmaya maruz bırakılan numuneler üzerinde basınç dayanımı, kapilarite ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N çimentoları karbonatlaşmaya en fazla direnç göstermiştir. %10 silis dumanı ve %10 uçucu kül katkılı beton serileri de karbonatlaşma derinliği ve gösterdiği direnç açısından hemen hemen CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N çimentolarla yapılan beton serilere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür (Özer, 2012).

Benzer şekilde Yazıcıoğlu ve ark (2012), tarafından yapılan çalışmada, 5 farklı tip çimento ile herhangi bir kimyasal katkı maddesi kullanılmadan karışımlar hazırlanarak beton numuneler üzerinde karbonatlaşma etkisi incelenmiştir. 28 gün normal suda kürlenmiş numuneler 1, 3 ve 7 gün süre ile yoğunlaştırılmış karbondioksit ortamında bekletilmiştir. Deney neticesinde, gün sayısının artması ile birlikte karbonatlaşma miktarı da artmıştır. En az karbonatlaşma derinliğine sahip olan çimento tipleri CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N, en fazla karbonatlaşma derinliğine sahip ise CEM II 32,5R ve CEM IV 32,5R tipi çimentolar olmuştur (Yazıcıoğlu ve ark., 2012).

Yüzey işlemi, betonun karbonatlaşmaya karşı direncini arttırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu işlem aynı zamanda betonun içindeki karbonatlaşma reaksiyonlarını geciktirir. Aguiar ve Junior (2013), tarafından yapılan çalışmada, yüzey korumalı betonlar ve yüzeyi korunmayan betonlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan yüzey korumalı betonlar, karbonatlaşma difüzyon katsayıları korunmayan betonlardan daha düşük çıkmıştır. Yapılan çalışmada epoksi kullanımı; reçine, akrilik ve siloksan reçinelerin kullanımından daha iyi koruma sağlamıştır. Dolayısıyla, geçirimsiz bir betonun elde edilebilmesi için yüzey korumanın önemli ölçüde etkisi olduğu kanısına varılmıştır. Bu sonuca dayanarak istenilen hizmet ömrü ancak yüzey koruma işlemleri ile elde edilebileceği önerilmiştir (Aguiar ve Júnior, 2013).

Kara (2013), tarafından yapılan bir çalışmada, farklı oranlarda %5, %10 ve %15 mermer tozu atığı kullanılarak betonda karbonatlaşma etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, malzeme olarak CEM I 42,5R çimentosu, mermer tozu ve silis dumanı kullanılarak sekiz tip C30 sınıfı beton üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde karbonatlaşma, basınç dayanımı, aşınma dayanımı, ultrases geçiş hızı ve kapılar su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda, farklı oranlardaki mermer tozu, silis dumanı ve mermer tozu + silis dumanı içeren betonlar karbonatlaşma miktarı arttıkça; basınç

dayanımının arttığı, aşınma dayanımının düştüğü, ultrases hızı değerlerinin arttığı ve kapilarite katsayısının azaldığı görülmüştür (Kara, 2013).

Benzer şekilde Yazıcıoğlu ve Kara (2017), tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda %0, %5, %10 ve %15 mermer tozu çimento ile ikame edilmiş beton numuneler üzerinde karbonatlaşma etkisi araştırılmıştır. Deney neticesinde, en fazla karbonatlaşma miktarı %15 mermer tozu içeren betonlarda görülmüştür. Mermer tozu miktarının artmasıyla karbonatlaşma miktarında ve basınç dayanımında artma, aşınma dayanımında ve kapilarite katsayısında ise azalma görülmüştür (Yazıcıoğlu ve Kara, 2017) .

Şimşek ve Baharavar (2014), tarafından yapılan bir çalışmada, çimento yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ve çelik lif hacimce %1 oranında betonlara eklenmiştir. Deneyde, uçucu kül ve çelik lif karbonatlaşmayı azaltıcı yönde olumu etki göstermiştir. Uçucu kül oranı arttıkça CaO'in azalmasına ve karbonatlaşma derinliğinin düşmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, uçucu kül oranı karbonatlaşma derinliği ile ters ilişkili olmaktadır (Şimşek ve Baharavar, 2014).

Salvoldi ve ark. (2015), tarafından yapılan hızlandırılmış karbonatlaşma testinde, normal portland çimentosu, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Karbonatlaşma derinliği 3, 6, 9 ve 12 haftalık zaman periyotlarında ölçülmüştür. Karbonatlaşma derinliği, beklendiği gibi zamanla artmıştır. Çalışmada, en az karbonatlaşma miktarı CEM I karışımında, ardından silis dumanı karışımında görülmüştür. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu karışımları, CEM I ve silis dumanı karışımlarından daha fazla karbonatlaşma yapmıştır (Salvoldi ve ark., 2015).

Wang ve ark. (2017), tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül betonun karbonasyonu üzerine, gerilme durumu, yüksek sıcaklığa maruz kalma ve uçucu kül içeriği olmak üzere üç faktörün etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmadaki değişkenler ve testte göz önünde bulundurulmuş seviyeler: uçucu kül içeriği (%0, %30), sıcaklık (20 ± 2 °C, 150 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C, 550 °C), gerilme durumları (gerilmemiş, çekme gerilmesi, basınç gerilmesi) ve gerilme düzeyleri (0, $0.3f_t$, $0.5f_t$, $0.7f_t$, $0.9f_t$; $0.3f_c$, $0.5f_c$, $0.7f_c$, $0.9f_c$) olmaktadır. Burada f_t eğilme mukavemeti ve f_c örneklerde betonun basınç dayanımıdır. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi için örnekler, tasarlanan karbonatlaşma yaşına (7 gün ve 14 gün) kadar CCB-70B hızlandırılmış karbonatlaşma odasına konulmuştur. Test sırasında, odadaki sıcaklık ve bağıl nem sırasıyla 20 ± 2 °C ve $\%70\pm 5$, karbondioksit konsantrasyonu ise $\%20\pm 3$ olarak kontrol edilmiştir. Örnekler test edilecek karbonatlaşmış yaşa geldiğinde (7 gün ve 14

gün), depodan çıkarılmış ve uzunluk boyunca iki yarım prizma halinde ayrılmıştır. Taze kırık yüzeylerine standart phenolphthalein solüsyonu püskürtülerek karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Deneylelerden elde edilen sonuçlara göre; betonun karbonatlaşma derinliği çekme gerilmesinin artmasıyla artmış ve gerilme düzeyinin yükselmesiyle karbonatlaşma derinliği de o kadar büyük olmuştur. Belirli bir karbonatlaşma yaşı ve gerilme durumu için, %30 uçucu kül içeren betonunun karbonatlaşma derinliği, normal betondan daha fazla çıkmıştır. Sıcaklığın artmasıyla karbonatlaşma derinliği düşmüştür. Gerilme, yüksek sıcaklık ve yüksek uçucu kül içeriği faktörlerin birleşimi, betonun karbonatlaşma direncini önemli ölçüde azaltmıştır. Yüksek sıcaklık, uçucu kül içeren betonunun karbonatlaşma direncine etkisi, normal betona göre daha yüksek olmuştur. Uçucu kül içeren betonun karbonatlaşma derinliğinin, 350 °C'yi geçen sıcaklıkta, 14 günde, normal betonun iki katından daha fazla olduğu görülmüştür (Wang ve ark., 2017).

Zhuguo ve Sha (2018), tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı jeopolimer beton ve jeopolimer harçlarının karbonatlaşma derinlikleri farklı zaman periyotlarında hızlandırılmış karbonatlaşma testi ile ölçülmüştür. Çalışmaların neticesinde; uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimer betonun başlangıçtaki artan karbonatlaşma derinliği, normal portland çimento betonunkinden daha fazla olmuştur. Yüksek fırın cürufu ne kadar ince olursa uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimer betonun karbonatlaşma hızı katsayısı o kadar az olur. Kürlenme sıcaklığı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimer betonun özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Oda sıcaklığında kürlenme, ısı kürü ile karşılaştırıldığında daha düşük karbonatlaşma direnci verir. Bununla birlikte, eğer sertleşme süresi aynı ise, 60 °C ve 80 °C kürlenme arasında büyük bir fark yoktur. Jeopolimer betonun karbonatlaşma direnci, basınç dayanımı ile ilgilidir. Daha yüksek bir mukavemete sahip beton, genellikle daha yüksek bir karbonatlaşma direnci eğilimindedir. Fakat jeopoimer betonun karbonatlaşma direnci, alkali aktivatör tipi gibi diğer faktörlerden de etkilenir (Zhuguo ve Sha, 2018).

Merah ve Krobba (2017), tarafından yapılan çalışmada, karbonatlaşmanın ve çimento tipinin (kalker çimento (CEM II) ve sıradan portland çimentosu (CEM I)) betonun süneklik ve basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. İki beton formülasyonundan 100x100x100 mm boyutlarında kübik numuneler ve 100x100x400 mm ebatlı kiriş numuneler hazırlanmıştır. Kübik numuneler, karbonatlaşma derinliği ve basınç direnci ölçümleri için, kiriş örnekler ise, karbonatlaşma derinliği ve yer

değiştirme sünekliği ölçümleri için üretilmiştir. Sonuç olarak, yer değiştirme sünekliğinin karbonatlaşma ile azaldığı görülmüştür. Öte yandan, basınç direnci, karbonatlaşma süresi boyunca artmıştır. Ayrıca, portland çimentosu (CEM I) ile formüle edilmiş beton, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, karbonatlaşmış numuneler hızlandırılmış karbonatlaşma maruziyetinin 7. günü için yer değiştirme süneklik katsayısının azalma oranının %30 olduğu gösterilmiştir. Ancak, kalker katkılı çimento (CEM II) ile formüle edilmiş beton numuneleri, kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, karbonatlaşmış numunelerin yer değiştirme süneklik katsayısının azalma oranı %14 kadar olmuştur. Dolayısıyla, karbonatlaşmanın betonarme yapıların ömrünü, esasen süneklik kapasitesini ve dolayısıyla sismik eylemlere karşı direncini azalttığı belirtilmiştir (Merah ve Krobba, 2017).

Özcan ve Atiş (2017), tarafından yapılan çalışmada, silis dumanlı harçlar kullanılarak karbonatlaşmanın ve rötrenin özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada normal portland çimentosu ağırlıkça %10, %15, %20 ve %40 oranlarında silis dumanı ile ikame edilmiş ve su-bağlayıcı oranları 0.25, 0.30, 0.40, 0.50 ve 0.60 olarak alınmıştır. Deney neticesinde, %10 ve %15 oranlarındaki silis dumanı karbonatlaşmayı düşürmüş, %40 oranındaki silis dumanı ise karbonatlaşmayı arttırmıştır. Su-bağlayıcı oranı 0.25 ve 0.30 olan harçlarda, %40 silis dumanı ilavesi dışında diğer tüm numunelerde rötreyi azaltmıştır (Özcan ve Atiş, 2017).

2.2. Karbonatlaşmanın Betona Sakıncaları

Karbonatlaşmanın başlıca sakıncası; korozyona neden olmaktadır. Bir değer sakınca ise rötreye olaydır. Hidrolik rötreye ile birlikte gelişen karbonatlaşma rötresi hemen hemen hidrolik rötreye mertebesindedir. Ancak, karbonatlaşmanın çok yavaş gelişmesi nedeniyle rötrenin oluşturduğu çatlaklar yüzeyseldir ve taşıyıcılık yönünden sakıncaları yoktur. Karbonatlaşmanın betonda yarattığı olumsuz etkiler şu şekilde sıralanır:

- Sertleşmiş çimento hamuru karbonatlaşma sebebi ile büzülme göstermekte ve betonun genleşmesine ve çatlamasına yol açmaktadır.
- Karbonatlaşma neticesinde, kalsiyum hidroksitin çözünmesi sebebiyle, betonun içerisindeki alkalin ortamı daha düşük seviyeye inmektedir. Böylece, karbonatlaşma bölgesinde yer alan betonarme demirlerinin paslanması daha hızlı olabilmektedir (Baharavar, 2016).

2.3. Karbonatlaşmanın Betona Yararları

Karbonatlaşmanın beton üzerinde olumsuz etkilerinin yanında betona olumlu etkileri de bulunmaktadır. Betonda karbonatlaşmanın yarattığı olumlu etkileri şu şekilde sıralanabilir:

- Betonun basınç dayanımında bir miktar artış meydana gelmektedir. Bunun sebebi, karbonatlaşma neticesinde az miktarda serbest kalan su, çimentoda yer alan hidrasyona yardımcı olmaktadır (Yazıcıoğlu ve ark., 2012; Baharavar, 2016).
- Karbonatlaşma sonucu oluşan kalsiyum karbonat kristalleri, beton boşluklarında yerleşerek daha geçirimsiz beton oluşmaktadır. Dolayısıyla, az miktardaki karbonatlaşmanın beton dayanımı üzerinde olumlu etkisi vardır (Kara, 2013; Baharavar, 2016).

2.4. Karbonatlaşmaya Etki Eden Beton Bileşenler

Betonun karbonatlaşmasını etkileyen bileşenler, betonun içeriğini oluşturan çimento, agrega, su, hava koşulları ve gerektiğinde betona katılan katkı maddeleridir. Bu bölümde beton içyapısını oluşturan çimento, agrega, su, ortam koşulları ve gerektiğinde kullanılan katkı maddelerinin karbonatlaşma üzerindeki etkileri özetle incelenecektir.

2.4.1. Çimento

Çimento tipleri hem kimyasal bileşim açısından hem de betondaki dozajı açısından karbonatlaşmayı etkileyen önemli parametrelerden biridir. Çimento dozajının azalmasıyla karbonatlaşma miktarı artmakta ve çimento miktarının artmasıyla karbonatlaşma hızı düşmektedir. Öte yandan, kimyasal ürün olarak çimento bileşiminde %60-67 CaO içermektedir. Bu bileşim kimyasal reaksiyonlar nedeni ile kalsiyum hidroksiti oluşturmakta ve son olarak kalsiyum hidroksit, karbondioksitin etkisi ile karbonatlaşmaktadır (Özer, 2012).

Betonda kullanılan çimento miktarının dışında kullanılan çimentonun içeriği de önemlidir. Çimentoya üretim sırasında veya beton üretimi sırasında çimentonun yerine katılan değişik katkıları karbonatlaşmayı etkilemektedir (Gönen, 2003). Bilodeau ve Malhotra, uçucu küllü betonların karbonatlaşmayı azalttığını ileri sürmektedir (Bilodeau ve Malhotra, 2000). Fakat diğer bazı araştırmacılar ise tras, uçucu kül veya cürüflü

çimentolarda karbonatlaşma hızının yüksek olduklarını belirtmektedir (Akman, 1997; TS EN 197-1, 2002).

2.4.2. Agregalar

Beton bileşiminin hacimce büyük bir kısmını agregalar oluşturmaktadır. Dolayısıyla agregaların dayanıklılığı, su geçirgenliği, granülometrisi, tane şekli, yüzey pürüzlülüğü, mineral yapısı gibi birçok özellikleri karbonatlaşmayı etkiler. Agregalar tanelerinin yapısında bulunan boşluklar, betonun su geçirimsizliğini sağlayarak ileride don etkisine maruz kalabilir. Suyun donması halinde beton çatlak ve dış ortamdaki etkenlere açık duruma gelerek karbonatlaşma süreci daha hızlı gerçekleşir (Özer, 2012).

Agregalarda kil parçacıkları, yumuşak kalkerler veya kırılabilir kum taşları bulunabilir. Bu maddeler; İnce agregada en fazla %3, iri agregada ise en fazla %10 kadar olduğu söylenebilir. Bunlar su ile birleştiği zaman agregadan kolayca ayrılıp, negatif hacim değişikliklerine yol açmaktadır (Erdoğan, 1995).

Kilde bulunan kalkerler suya maruz kaldıkları zaman hacimsel genişlemeyi meydana getirirler ve neticede betonun bünyesinde oluşan gerilmelerden dolayı beton çatlayıp, karbonatlaşma derinliği artmaktadır.

2.4.3. Beton karışım suyu

Betonu oluşturan diğer en önemli bileşenlerden biri karma suyu olmaktadır. Karma suyu çimento taneleri ile reaksiyona girerek ona bağlayıcılık kazandırmaktadır. Aynı zamanda betonun dayanımı ve dayanıklılığını istenilen düzeyde sağlamak için bakım suyuna ihtiyaç bulunmaktadır. Suyun içerisinde bulunan çeşitli asitler $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek karbonatlaşmayı hızlandırır. Dolayısıyla, beton karışım suyu olabildiğince temiz olmalıdır. Her türlü zararlı etki yaratacak klorür, sülfat, asit, kil, silt ve organik gibi maddeler içermemelidir.

Su/çimento oranı da betondaki boşluk yapısını etkiler. Su/çimento oranı düşük olduğunda karbonatlaşma miktarı lineer bir şekilde artmaktadır (Erdoğan, 1995; Özer, 2012).

Suda çeşitli asitler bulunabilir. Bu asitler betona olumsuz etkileyen zararlı reaksiyonları sebebiyet vermektedir. Beton için zararlı kimyasal etki yapan ortam ve çeşitli iyonlar Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Beton için zararlı kimyasal etki yapan iyon ve ortamların sınır değerleri (TS 3440, 1982; Gönen, 2003)

| Zararlı Kimyasal Etkisi Olan İyonlar | Zararlı Etkinlik Derecesi | | |
|--------------------------------------|---------------------------|----------|----------------|
| | Zararlı | Kuvvetli | Çok Kuvvetli |
| pH değeri | 6.5-5.5 | 5.5-4.5 | 4.5'den büyük |
| Kireç çözücü (CO ₂ mg/l) | 15-30 | 30-60 | 60'dan büyük |
| NH ₄ ⁺ (mg/l) | 15-30 | 30-60 | 60'dan büyük |
| Mg ²⁺ (mg/l) | 100-300 | 300-1500 | 1500'den büyük |
| SO ₄ (mg/l) | 200-600 | 600-3000 | 3000'den büyük |

2.4.4. Ortam koşulları

Ortamdaki bağıl nem oranı, sıcaklık derecesi ve karbondioksit miktarı karbonatlaşmaya etkileyen önemli faktörlerdir. Kalsiyum karbonatın oluşabilmesi için ortamda su ve karbondioksit gazının bulunması şarttır. Karbonatlaşma en çok %50 bağıl nem ortamında meydana gelir (De Ceukelaire ve Van Nieuwenburg, 1993; TS EN 197-1, 2002; Özer, 2012). Malami ve Uwanuakwa'ya göre karbonatlaşmanın görüldüğü en fazla nem oranı %50 ile %60 arasındadır (Malami, 2014; Uwanuakwa, 2016). Bu miktar nem, betonun hızlandırılma deneylerinde kullanılabilir orandır (Baharavar, 2012).

Nem miktarı arttığı zaman ortamın karbondioksit difüzyonu zorlaşacaktır. Nem azaldığında ise, reaksiyonun ihtiyaç duyduğu su miktarı azaldığından karbonatlaşma hızı da azalacaktır (Malami, 2014).

Sıcaklık arttıkça karbonatlaşma hızı artar. Ancak, sıcaklık aşırı miktarda artarsa karbonatlaşma için gereken nem miktarı azalır, neticede karbonatlaşma hızı yavaşlar (Akman, 1997).

Ortamda bulunan karbondioksit gazı karbonatlaşma hızını etkileyen bir diğer faktördür. Temiz havada %0.03 oranında karbondioksit gazı bulunmaktadır. Bu oran bile karbonatlaşma için yeterlidir. Büyük şehirlerde ise bu oran %1'e kadar çıkabilir (Özer, 2012). Betonun boşluk yapısını ve dolayısıyla karbonatlaşmayı etkileyen diğer bir faktör betonun kürüdür. Puzolanik katkıları kür koşullarına hassastır. Yüksek kür yaşlarındaki bir beton, boşlukları tıkayıp karbonatlaşmayı azalmaktadır. Kür süresi arttıkça karbonatlaşma miktarı düşer. İki yıl sonunda, 28 gün kür edilen numuneler 7 gün kür edilen numunelere göre iki kat, 1 gün kür edilen numunelere göre ise 3 kat daha fazla karbonatlaşmaya karşı direnç gösterebilir (Gönen, 2003).

2.4.5. Betonda kullanılan katkılar

Betonun performansını veya özelliklerini geliştirmek amacıyla beton karışımına ilave edilen maddelere katkı adı verilir. Doğal puzolanlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silika tozu gibi puzolanik katkı maddeleri kür yaşlarına bağlı olarak dayanım kazanmaktadır. Bu tür katkıların yeterli kür edilmemeleri halinde basınç dayanımları düşük ve geçirimsizliği yüksektir.

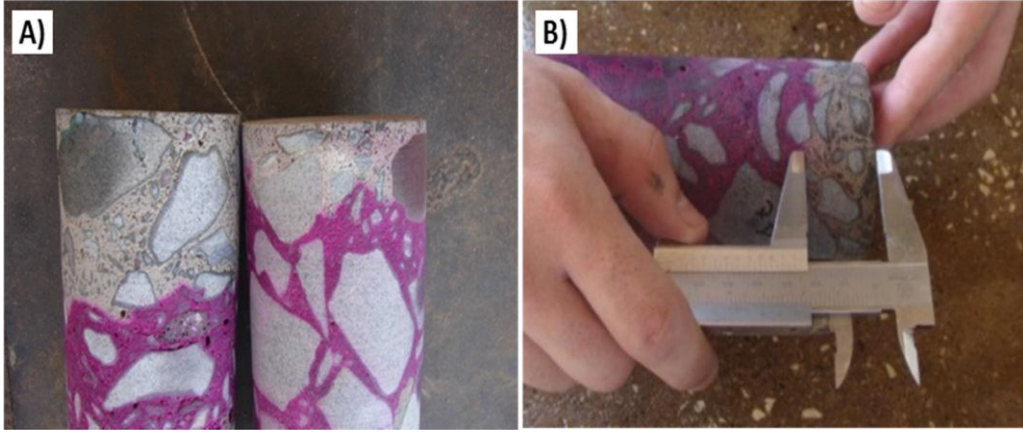
Karışımli çimentoların veya çimento yerine bu katkıların kullanılması, betonun agresif kimyasallar tarafından bozulmaya karşı direncini artırarak geçirgenliği azaltır (Malami, 2014).

2.5. Karbonatlaşma Miktarının Ölçülmesi

Karbonatlaşma derinliğini belirlemek için birçok yöntem vardır. Bu yöntemler, termogravimetrik analiz, infrared spektroskopisi, x-ışını difraksiyon yöntemi veya mikroelektrotlar ve yaygın olarak kullanılan indikatörlerdir (Marciniak ve ark., 2017). Ca(OH)_2 ve CaCO_3 'ün konsantrasyon dağılımını test eden termogravimetrik analiz yöntemi kullanılırken, x-ışını difraksiyon analizi, Ca(OH)_2 ve CaCO_3 'ün yoğunluk dağılımını test eder, fourier dönüşümü infrared spektroskopisi test yöntemi, CaCO_3 'ün varlığını belirlemek için temel olarak beton numunelerindeki C-O varlığını tespit eder (Chang ve Chen, 2006). Her test yönteminin kendi başlarına avantajları vardır, ancak sonuçta ortaya çıkan karbonlaşma derinlikleri benzerdir. Bu tekniklerin en yaygın indikatörlerin kullanılmasıdır. İndikatörler, kesilen beton yüzeyine püskürtülerek karbonatlaşma olmayan bölgelerin rengini değiştirirken karbonatlaşma olan bölgelerin rengini değiştirmez. Bu indikatörler;

- Nitramin
- Thymolphtalein
- In-nitrophenol
- ve Phenolphtalein'dir.

Çok yaygın kullanılan phenolphtalein göstergesi pH değerini belirlemek için beton yüzeyine püskürtülür. Püskürtülen beton yüzeyindeki renk değişimi olmayan alanların pH değeri 9'un altındadır. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi pembe rengi ile değiştiği alanlar alkaline olduğu alanlardır. Rengi değişmeyen alanlar ise karbonatlaşma bölgesidir ve bu alanlarda karbonatlaşma derinliği ölçülür (Gönen, 2003; Özer, 2012).



Şekil 2.3. Karbonatlaşma ölçüm sürecinin aşamaları: (a) phenolphtalein püskürtme (b) karbonatlaşma derinliğinin ölçümü (Possan ve ark., 2017)

Ayrıca, karbonatlaşma miktarı aşağıda verilen Eşitlik 2.1 ile belirlenebilir. Fakat dış ortam şartlarının değişken olması sebebiyle pratikte bu bağıntıyı kullanmak pek mümkün olamayabilir. Ancak bir fikir elde edilebilmektedir;

$$C = K\sqrt{T} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte, C üst yüzeyden ölçülen karbonatlaşma derinliği, K karbonatlaşma katsayısı ve T (yıl) zamandır. Dayanımı düşük olan bir beton için K katsayısı 3-4 mm/T^{0.5}, den daha büyük bir değer alabilir (Liang ve ark., 2000; Kara, 2013). Bu formüller yapının hizmet ömrünün kalan kısmını veya beton yüzey işleminin yapının hizmet ömrü üzerindeki etkilerini tahmin etmek için kullanılabilir (Yazıcı, 1998).

2.6. Karbonatlaşma Gelişimini Azaltacak Önlemler

Betonun, atmosferde bulunan karbondioksit ve oksijenden ve yeraltı sularında bulunan zararlı iyonlardan etkilenecek dayanımı ve dayanıklılığı düşmektedir. Betonu bu etkenlerden korumak için her şeyden önce geçirimsizliğinin sağlanması gerekir. Bunun için beton hacminin büyük bir kısmını oluşturan agreganın granülometrisi uygun seçilerek betonun permeabilitesini azaltmak mümkündür (Gönen, 2003). Siloksan ve reçine gibi koruyucu kaplamaların veya sızdırmazlık malzemelerinin kullanılması, betonun geçirgenliğini azaltarak karbondioksit ve diğer zararlı kimyasalların beton yapıya girmesini önler (Malami, 2014). Aynı zamanda betonun karbonatlaşma gelişimini azaltıcı önlem olarak S/Ç oranı düşük, en az C30 sınıfı beton kullanmak, yeterli paspayı ve betonu nem şartlarından korunmak gerekir. Bu konu ile ilgili detaylar aşağıda irdelenmiştir:

2.6.1. Çimento bileşimi ve dozajı

Çimentonun dozajı arttırıldığında beton yoğunluğu buna bağlı olarak artmaktadır. Puzolanlı çimentolar beton alkalinitesini etkilediği için daha geçirimsiz bir beton oluşumunu sağlar ve karbonatlaşma oluşumunu engellemeye çalışır. Yüksek dozajlı çimentolar karbonatlaşma hızını azaltacaktır (Yazıcı, 1998; Özer, 2012). Uygulamada karbonatlaşma açısından önerilen en az çimento miktarı 300 kg/m^3 'tür (Özer, 2012).

Çimento dozajının olduğu gibi çimento cinsi de bir o kadar önemlidir. Puzolanlı çimentolar kullanılması halinde, beton boşluklarını doldurarak betonun permeabilitesini düşürmektedir. Fakat, fazla miktarda puzolan kullanılması dayanım açısından sakıncalıdır (Gönen, 2003).

2.6.2. Su/çimento oranı

Düşük su/çimento oranının betonun geçirimsizliğine önemli bir etkisi vardır. Su/çimento oranı düşük olduğunda betondaki karma suyu daha az olup, dolayısıyla beton kurduktan sonra daha az miktarda su buharlaşır ve bu buharlaşma sonucu kılcal boşlukların az oluşmasıdır (Baharavar, 2012; Gülan ve ark., 2016).

Yüksek su/çimento oranı, sertleştirilmiş betonda boşlukların artmasına, gazın daha kolay difüzyonuna ve çimentonun daha fazla hidrasyonuna neden olur (Yazıcı, 1998). Bu durumda karbonatlaşma hızı artar. Uygulamada yüksek su/çimento oranı ile beton dökümünden sakınmak gerekir (Özer, 2012). Beton karışımı, düşük su/çimento oranına sahip optimum çimento içeriği ile yapılmalıdır (Malami, 2014).

Beton karışımında fazla su kullanılması durumunda betonun daha çok boşluklu olmasına müsaide edilmektedir. Dolayısıyla, pratikte kullanılabilir su oranının %40-50 arasında uygun olduğu söylenmektedir (Gönen, 2003).

2.6.3. Betonun kür süresi

Betonun kalıplara iyi şekilde yerleştirilmesi ve sıkıştırılması, betonun geçirimsizliğine ve dayanıklılığına önemli etkisi vardır. Beton kalıplara döküldükten sonra vibrasyon yapılarak tam olarak yerleştirilmesi gerekir.

Beton yerleştirildikten sonra kür süresi ne kadar uzatılırsa o kadar geçirimsiz beton sağlanmış olur ve karbonatlaşma gelişimini yavaşlatır. Karbonatlaşma olayı

görülse bile derinlere inmesi engellenmiş olur. Beton yeterince kür edildiği zaman hidrasyon ürünleri boşlukları tıkararak karbonatlaşmayı azaltmaktadır.

2.6.4. Beton rutubeti

Bağıl nem, karbonatlaşma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Su/çimento oranı 0.6 olan betonun 16 yıl sonunda, %100 bağıl nemde ortalama karbonatlaşma derinliği 0 mm, %95 bağıl nemde 4 mm ve %60'lık bağıl nemde 15 mm'dir (Malami, 2014). Su ve CO₂'ın bulunduğu her yerde karbonatlaşma meydana gelir. Bu yüzden temel gibi yapı elemanlarında yer altı sularına karşı yalıtım yapılarak karbonatlaşma oluşumu engellenmiş olur.

Sıva gibi koruyucu malzemeler ile betonun kaplanması karbonatlaşmayı azaltıcı yönde etkilidir. Özellikle sıvalarda perdelamaya ve çatı katta yağmur ve kardan etkilenmemek için boşluksuz bir yüzey elde etmeye özen gösterilmelidir.

2.6.5. Mineral katkıları

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi mineral malzemelerin çimento yerine ikame edilmesi ile daha yoğun mikro yapıya sahip beton üretilebilir. Daha yoğun mikro yapıya sahip beton oluştuğunda, beton daha az geçirgen hale gelir, CO₂'in betona girmesi zorlaşır ve Ca(OH)₂'yi bağlanmasından dolayı ortamın pH'ını düşürür. Böylece betonun karbonatlaşması uzun zaman alır (Malami, 2014).

2.6.6. Basınç dayanımı

Beton dayanımı arttıkça karbonatlaşma miktarı azalır. Bu durum her tip beton için geçerlidir. Hem karbonatlaşma hem de basınç dayanımı betonun boşluk yapısından önemli derecede etkilenir. Diğer taraftan karbonatlaşmanın bir ürünü olarak meydana gelen kalsiyum karbonat, kalsiyum hidroksitten daha çok hacim kaplaması nedeniyle, karbonatlaşmış betonların yüzey porozitesini azaltır.

Daha düşük su/çimento oranından daha yüksek basınç dayanımlı beton elde edilir. Betondaki düşük su/çimento oranı, fazla suyun betondan buharlaşmasını önler, fazla suyun buharlaşması, betonun gözenekli olmasını sağlar. Dolayısıyla, karbonatlaşmaya ve diğer dayanıklılık sorunlarına neden olur (Malami, 2014).

2.6.7. Betonun kaplanması

Betonun alkalın yapısını korumak ve geçirimsizliğini sağlamak için CO₂ girişinin engellenmesi gerekir. Siloksan, silan, reçine, epoksi ve akrilik gibi koruyucu kaplamaların veya sızdırmazlık malzemelerinin kullanılması ve beton yüzeyini kireç yönünden zengin portland çimentolu bir sıva ile örtülmesi gibi işlemler betonun geçirgenliğini azaltır, CO₂ ve diğer zararlı kimyasalların beton yapıya girmesini önler. Betonun kaplanması yöntemi, karbonatlaşmanın ve yapının gücünü ve dayanıklılığını azaltan ve korozyona neden olan birçok probleme karşı etkili bir yöntemdir.

2.7. Betonda Sülfat Etkisi

Beton, bulunduğu her türlü dış ortamlardan etkilenir. Bu ortamlarda bulunan çeşitli iyonlar beton bileşenleri ile tepkimeye girerek betonun hacimsel stabilitesini bozar. Bu iyonların en önemlileri sülfat tuzlarıdır. Betona hasar veren sülfatların başlıcaları sodyum, magnezyum, kalsiyum, potasyum ve amonyum gibi katyonlar olmaktadır.

Betona yapılan sülfat saldırısı, şüphesiz dayanıklılığı etkileyen önemli bir konudur ve istemsiz olarak bir kimyasal saldırı biçimi görülebilir. Normalde, sülfatların neden olduğu beton hasarı için iki mekanizma vardır; kimyasal sülfat saldırısı ve fiziksel sülfat saldırısı. Kimyasal sülfat saldırısı, sülfat ortamında betonun zarar görmesine neden olan zararlı ürünlerin fiziksel kristal büyümesinin yanı sıra, kimyasal reaksiyonlar yoluyla etrenjit, alçı ve tomazit gibi ürünlerin oluşturulmasından ibarettir. Başka bir deyişle, sülfat tuzları ile çimento mineralleri arasındaki kimyasal etkileşimdir (Zhutovsky ve Hooton, 2017). Fiziksel sülfat saldırısı veya sülfat kristalleşmesi ise betonun gözeneklerinde sülfatın kristalleşmesini ifade eder (Liu ve ark., 2018). Sülfat iyonları, betonun gözenek çözeltisiyle reaksiyona girerek gecikmiş etrenjit adı verilen kalsiyum-sülfo-alüminat üretmektedir. Gecikmiş etrenjit, kristallerinin büyümesine ve geniş strese neden olur ve beton yapıların dayanıklılığını azaltacak olan mikro çatlakların çekirdeklenmesine ve büyümesine yol açar (Song ve ark., 2016). Etrenjit oluşumu, sülfat konsantrasyonu düşük olduğunda bile meydana gelir ve oluşum süreci, ortam sıcaklığındaki değişikliklere ve kalsiyum alüminat hidrat fazlarının gözenek çözeltisindeki çözünürlüğüne bağlıdır (Zhao ve ark., 2018). Aynı zamanda beton, sülfat saldırısına maruz kaldığında betonun bünyesinde bulunan kalsiyum hidroksit deniz suyu veya yeraltı suyunun yapısında bulunan Na₂SO₄, MgSO₄ ve K₂SO₄ gibi tuzlar ile

reaksiyona girerek alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oluşumuna sebep olmaktadır. Doğal alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tabakalarındaki sülfat konsantrasyonu oldukça yüksektir. Bu da etrenjitin oluşumu gibi betonun genişmesine yol açmaktadır (Alişer ve ark., 2016). Betonun genişmesine ve çatlmasına sebep olarak alçıtaşı ve etrenjitin oluşumu, reaktan maddelerin hacminde yaklaşık 1.2-2.2 kat artış sağlar (Najjar ve ark., 2017). Alçı oluşumunun herhangi bir genişlemeye yol açtığı fikri tartışmalı bir konudur. Bu konuyu açıklamak için Tian ve Cohen yazdığı bir makalede, sülfat saldırısı sırasında alçı oluşumunun geniş olduğu fikrini destekleyen ve çelişen farklı teorileri tanımlayan bir literatür taramasından ve yazarlar tarafından yürütülen laboratuvar sonuçlarından yola çıkarak, sülfat saldırısı sırasında alçı oluşumunun genişlemeye neden olabileceğini göstermiştir (Tian ve Cohen, 2000). Nihayetinde, sülfat saldırısına uğramış betonun mukavemetinde düşme olmaktadır ve karakteristik görünümünde, özellikle köşe ve kenarları gibi daha hassas noktalarından bozulmalar başlayarak beton yüzeyinde beyaz lekeler, çiçeklenmeler ve çatlaklar meydana gelmektedir (Göktepe, 2008).

Katı ve kuru tuzların betona bir etkisi yoktur, ancak suyun bulunduğu ortamda, sertleşmiş çimento harcı ile bir takım kimyasal reaksiyonları gerçekleştirerek betona olumsuz etki eder. Zemin yüzeyinde ve topraklarda oluşan bu katı ve kuru tuzlar, genel olarak sodyum sülfat ve magnezyum sülfattır. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat tuzları beton içerisine sızan sular ile birlikte nüfuz ederek genişleme yaratmakta ve betondaki bağlayıcılık değerini azaltmaktadır (Kuyumcu, 2006).

Betona sülfat saldırısı, topraktan ya da zemin sularından kaynaklanabilir. Dolayısıyla, inşaatlarda yapılacak çalışmaları için zemin etüdünün yanında, topraktan ve yeraltı suyundan numuneler alınarak betona zarar verebilecek maddelerin olup olmadığı incelenmelidir. Burada sülfatla ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kılıç (2003), tarafından yapılan çalışmada, magnezyum sülfat ile %2, %4, %6 ve %8, sodyum sülfat ile %0.5, %1, %2 ve %3 ve sodyum sülfür ile %0.005, %0.01, %0.02 ve %0.03 çözeltiler hazırlanmıştır. Bu çözeltilerle üretilen numuneler üzerinde birim ağırlık, ultrases, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, en çok zararlı etki magnezyum sülfatta ve ardından daha az zararlı etki sodyum sülfatta görülmüştür. Sodyum sülfür ise, basınç dayanımında bir miktar artış göstermiştir. Bu çözeltiler, harçların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlerinde pek değişim yapmamıştır. Bu değişim en çok %2-3 civarında olmuştur. Sodyum sülfat etkisi, magnezyum sülfata oranla daha az eğilme mukavemeti göstermiştir. Magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve sodyum sülfürün ultrases hızı değerleri çok fazla değişmediği,

magnezyum sülfatın ve sodyum sülfatın rötreyi artırdığı ve sodyum sülfürün rötreyi azalttığı görülmüştür (Kılınç, 2003).

Alişer ve ark (2016), tarafından yapılan çalışmada, cam lif takviyeli çimento harçlarına mermer tozu ilave edilerek sülfata karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Yapılan deney sonunda, cam lif takviyeli çimento harçlarında atık mermer tozunun ilave edilmesi hem sülfat dayanıklılığı açısından hem de ekonomik açısından olumlu kazanımlar sağlayabileceği belirtilmiştir (Alişer ve ark., 2016).

Dikme (2010), bu çalışmada dört farklı mineral katkı maddesi uçucu kül, yüksek fırın cürufu, nano silika ve mikro silika katkıları kullanılarak sülfat saldırısına karşı davranışları incelenmiştir. Çalışmanın neticesinde, betona mineral katkıların eklenmesi, özellikle yüksek fırın cürufu kullanılması halinde, iç ve dış sülfat etkisinden kaynaklanan deformasyonları önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür (Dikme, 2010).

Arel ve Thomas (2017), tarafından yapılan çalışmada, mikro-silika (MS), nano-silika (NS), C sınıfı uçucu kül (UK) ve meta-kaolin (MK)'nin iç ve dış sülfat ataklarına maruz kalan harçların dayanıklılığı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, iç sülfat saldırısı için farklı sülfat iyonları oranlarına sahip 3 farklı kumdan harçlar üretilmiştir. Diğer taraftan harici sülfat saldırısı için sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri hazırlanmıştır. 23 haftalık yapılan bir deney neticesinde, NS ve MS partiküllerinin, iç ve dış sülfat ataklarına karşı diğer minerallerden (UK ve MK) daha etkili olduğu tespit edilmiştir. NS sülfata direnci açısından MS'ye göre ortalama %2-10'luk bir iyileşme olduğu göstermiştir. Tüm karışım oranları ve testler göz önüne alındığında, dayanım ve dayanıklılık açısından en az etki MK'de olduğu görülmüştür. Ek olarak, bütün test verileri karşılaştırıldığında, magnezyum sülfatın sodyum sülfata göre yaklaşık olarak %1-10 daha tahrip edici olduğu bulunmuştur (Arel ve Thomas, 2017).

Arslan (2014), tarafından yapılan çalışmada, sülfat etkisine maruz kalmış mikro silika, nano silika, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılı harçların durabilitesi incelenmiştir. Bunun için sülfat içeriği ihmal edilebilir seviyede olan Sakarya Kumu kullanılarak harç numuneler hazırlanmıştır. Üretilen farklı oranlarda mineral katkılı ve katkısız referans numuneler %5 oranında sodyum sülfat içeren çözeltilde bekletilmiştir. Ayrıca, doğal sülfat içeriği yüksek olan Irak Kumu kullanılarak üretilen çeşitli oranlarda mineral katkılı numuneler su küründe bekletilmiştir. Bu şekilde, dış ve iç sülfat etkisine maruz kalmış numuneler üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, boy değişimi ölçümleri ve ultrases geçiş hızı tayini deneyleri

yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre bu katkı oranlarına bağlı olarak sülfat etkisinde boy uzamalarını önemli ölçüde azaltmıştır. Mineral katkı arasında boy uzamalar dikkate alındığında, mikro silika katkısı en çok faydayı sağlamıştır. Katkısız ve dış sülfat etkisinde bekletilmiş numuneler zaman içerisinde ciddi hasarlara ve dökülmelere yol açmıştır. Dış sülfat etkisinde maruz kalan numunelerin suda bekleyen numunelere göre basınç dayanımında %38 ve eğilme dayanımında %66 kayıp olmuştur (Arslan, 2014).

Canpolat ve Yılmaz (2002), tarafından yapılan çalışmada, %5 ve %10'luk sodyum sülfat çözeltileri kullanılarak uçucu külün ve doğal zeolitin sülfata karşı direnci araştırılmıştır. Sodyum sülfatın harç üzerindeki etkileri zeolitin oranına göre değerlendirilmiştir. Zeolit katkılı numunelerde yüksek konsantrasyonda bile 90. güne kadar herhangi bir çatlama, dökülme ve parçalanma gözlenmemiştir aksine olumlu etki göstermiştir (Canpolat ve Yılmaz, 2002).

Ilıca (2008), tarafından yapılan çalışmada, CEM III 32.5N ve CEM III 42.5N, uçucu kül ile ikame edilmiş CEM I 42.5R, SDC 32.5N sülfat ve deniz suyu ortamında betonun dayanıklılığına etkisi araştırılmıştır. Bunun için C25, C30, C35 ve C40 dayanım sınıflarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde ağırlık değişimi, boy değişimi ve ultrases hızı tayini deneyleri yapılmıştır. Yedi aylık deney sürecinin sonunda CÇ42.5-C25 numunelerinin en çok ağırlık kaybına, en fazla boy değişimine ve en yüksek ultrases hızı kaybına ulaştığı gözlenmiştir. SDC numunelerin cürufu çimentolara kıyasla sülfat dayanıklılığı beklendiği gibi yüksek olmamıştır (Ilıca, 2008).

Kardeşler (2005), bu çalışmada, magnezyum sülfat çözeltileri beton karışım suyu olarak kullanılarak uçucu küllü beton üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneylerde malzeme olarak, portland çimentosu (PÇ 42.5), %2, %4, %6 ve %8 oranlarında magnezyum sülfat çözeltileri ve uçucu kül %10, %25 ve %37.5 oranlarında çimento yerine kullanılmıştır. Yapılan çalışmaların neticesinde; magnezyum sülfat priz başlama ve bitiş sürelerini geciktirmiştir, bu etki uçucu kül oranının artışı ile artmıştır. Magnezyum sülfat oranının artışı ile mukavemet değerlerinde azalma görülmüştür. Ancak, uçucu kül yüzdesinin artışı ile magnezyum sülfatın zararlı etkisi azalmıştır. Magnezyum sülfatın su emme miktarını ve rötreyi arttırdığı, uçucu külün ise rötreyi ve su emme miktarını azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla, uçucu külün kullanılması sülfata karşı direnç açısından yararlı olacağı belirtilmiştir (Kardeşler, 2005).

Atiş ve ark (2016), tarafından yapılan çalışmada, sodyum sülfat (Na_2SO_4) ilaveleriyle aktifleştirilen uçucu kül katkılı harç örneklerinin dayanımları araştırılmıştır. Bu amaçla, imento yerine ağırlık bazında %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ikame edilmiştir ve toplam bağlayıcı oranının %0, %2 ve %4 Na_2SO_4 kullanılarak harç numuneler üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarına göre 28 ve 90 gün sonundaki harç numunelerin dayanımları Na_2SO_4 kimyasal aktivatör ilavesi ile azalmalar olmuştur. Özellikle %4 oranındaki Na_2SO_4 'in dayanım kaybı oldukça yüksek olmuştur. Uçucu kül oranının artışı ile Na_2SO_4 'in etkisi erken dayanımlarda daha belirgin şekilde grlmştir. Na_2SO_4 ilaveli harçların geç yaşlarında su emme değerlerinde bir miktar artış göstermiştir (Atiş ve ark., 2016).

Shannag ve ark (2002), tarafından yapılan çalışmada, yüksek performanslı betonun sülfat dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bunun için çeşitli oranlarda doğal puzolan ve silis dumanı içeren yüksek performanslı beton karışımları (ağırlıkça %15'e kadar imento) hazırlanmış ve l Deniz ve Kızıldeniz sularında, sodyum ve magnezyum sülfat zeltelerinde bekletilmifitir. Araştırmada, %15 doğal puzolan ve %15 silis dumanı içeren beton karışımının sülfat zelteleri ve deniz sularında en iyi korumayı gösterdiği belirtilmiştir. Sıradan portland imentosu kullanılarak yapılan yüksek mukavemetli beton karışımının sülfat zelteleri ve deniz sularında yeterli bir performans gösterememiştir. Numuneler, sülfat zelteleri ve deniz sularında bir yıllık depolamadan sonra gücünün %65'inden fazlasını korumuştur. Bu araştırmada, şiddetli sülfat ortamlarında betonun daha iyi performansı için doğal puzolan ile birlikte silika dumanının kullanılması önerilmektedir (Shannag ve Shaia, 2003).

Sarıbaş ve akır (2017), sodyum sülfatın ve sodyum klorürün beton üzerindeki dayanımı ve dayanıklılığına etkisini araştırmıştır. Bu alışma kapsamında, üretilen 16 grup sertleşmiş harç numuneler sodyum sülfat, sodyum klorür, hava ve su ortamlarında kr edildikten sonra üzerinde deneyler gerekleştirilmifitir. Yapılan deneyler sonucunda, kısa süreli olarak sodyum sülfat ve sodyum klorür ortamlarına bekletilen ve S/ oranı yüksek olan sertleşmiş harç numunelerinin en az dayanıma ve dayanıklılığa sahip olduğu grlmştir. Yüksek S/ oranı, numunelerin birim ağırlığı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmasına rağmen sülfat zeltisinde kr edilen numunelerin birim ağırlığı üzerinde olumsuz bir etkisi olmamıştır. S/ oranı, numunelerin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Spesifik harç örneklerinin basınç dayanımı bilinen test gününe kadar artarken, sülfat iyonları saldırısından kaynaklanan basınç dayanımı

değerleri azalmıştır. Aynı şekilde sülfat çözeltisinde kürlenmiş harçların eğilme mukavemeti düşmüştür (Saribas ve Cakir, 2017).

Choudhary ve ark. (2018), tarafından yapılan çalışmada, sülfat nedeniyle betonun bozulması x-ışını difraksiyonu ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak takip edilmiştir. Bu testlerin sonuçlarına göre betonun içyapısında ve yüzeyinde oluşan beyaz kristal malzemelerinin, thenardite (Na_2SO_4) ve mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kristalleri olarak kristalize edilmiş sodyum sülfat olduğu gösterilmiştir. Bunlar, beton gözeneklerinde yüksek kristalleşme basıncı oluşturur ve betonun dökülmesine neden olur (Choudhary ve ark., 2018).

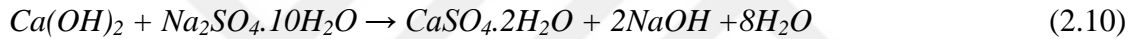
Suleiman ve ark. (2014), farklı yüzey işleme malzemeleriyle kaplanmış, S/Ç = 0.45 ve 0.60 ile yapılan beton silindirlerin fiziksel sülfat saldırılarına direnci araştırılmıştır. Sonuçlara göre; S/Ç oranının düşürülmesi, fiziksel sülfat saldırısına maruz kalan betonun performansını artırmıştır. Epoksi ve silan bazlı yüzey işleme malzemelerinin betonun fiziksel sülfat saldırısına korumak için yeterli olduğu bulunmuştur. Epoksi ve bitüm bazlı kaplama, beton yüzeyinde, sülfatların zorlukla nüfuz edilebilecek ve kılcal su yükselmesini azaltacak kalın bir koruyucu membran oluşturur. Silan ise, beton yüzeye nüfuz eder ve beton gözenekler içinde kimyasal reaksiyona girerek su itici olarak işlev gören moleküller sağlayıp sülfat içeren suyun beton gözeneklere girmesini engeller. Aynı zamanda, kılcal damarların yükselmesini ve tuz kristalleşmesini önleyebilir (Suleiman ve ark., 2014).

Al-Dulaijan ve ark. (2003), tarafından yapılan çalışmada, farklı sodyum sülfat konsantrasyonlarına maruz kalan düz ve karışımli çimentoların performansı değerlendirilmiştir. Bunun için Tip I, Tip V, Tip I artı silika dumanı ve Tip I artı uçucu kül olmak üzere dört tip çimento ile üretilen örnekler, %1, %1.5, %2, %2.5 ve %4 sülfat konsantrasyonlarına sahip beş sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat direnci, görsel inceleme ve basınç kuvvetindeki azalma ölçülerek değerlendirilmiştir. Sülfat saldırısına bağlı olarak azami bozulma, Tip I çimentoda, ardından silika dumanı ve Tip V çimentolarında görülmüştür. Tip V, Tip I artı silika dumanı ve Tip I artı uçucu külün performansı aralarında önemli ölçüde bir fark görülmemiştir. Silika dumanı veya uçucu kül ile harmanlanmış Tip I çimentonun sülfat direnci açısından hem sülfat atağı hem de klorür ortamlarında kullanılması faydalı olduğu gösterilmiştir (Al-Dulaijan ve ark., 2003).

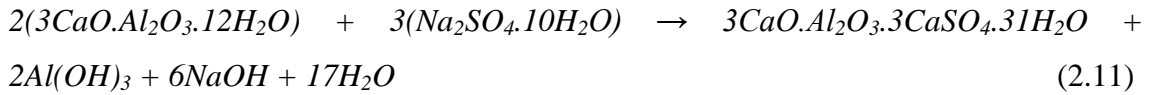
2.8. Sülfatların Betonda Yarattığı Zararlı Reaksiyonlar

Beton, sülfatlı ve nemli ortamlara maruz kalması halinde sülfatların çimento bileşenleri ile özellikle C₃A ile yaptığı reaksiyonlar neticesinde etrenjit oluşumuna sebep olmaktadır (Göktepe, 2008). Bu bileşiğin oluşumu sertleşmiş betonda hacim artışı meydana getirerek çatlama, dağılma ve parçalanma gibi hasarlara yol açmaktadır. Uzun zaman içerisinde sülfat etkisine maruz kalan bir beton dayanımı, dayanıklılığı ve rijitliğini kaybedip dağılmaktadır (Ilıca, 2008). Yeraltı ve deniz suyu ortamlarında en çok Na₂SO₄, MgSO₄, K₂SO₄ ve CaSO₄ şeklinde bulunan bu tuzlar beton yüzeyine temas ederek bazı reaksiyonları gerçekleştirir. Bu sülfat tuzları arasında en çok zararlı etkiye sahip MgSO₄'in olduğu bilinmektedir (Neville, 2004).

Na₂SO₄ ve Ca(OH)₂'in yaptığı reaksiyon denklem 2.10'da yazılmıştır. Bu reaksiyonun neticesinde katı fazın hacminde %124 kadar bir artışı meydana gelmektedir.

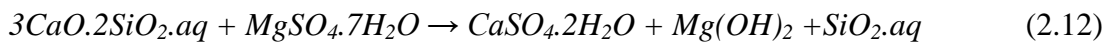


Çimento bileşenleri arasında en çok sülfat reaksiyonlarına müsaade eden C₃A'nın Na₂SO₄ ile yaptığı reaksiyon denklem 2.11'deki gibi gelişir:



CaSO₄ sadece C₃A ile reaksiyona girmekte ve kalsiyum-sülfo-alüminatı (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·31H₂O) oluşturmaktadır. Burada ise, katı fazın hacminde %227 kadar artış meydana gelmektedir.

Öte yandan, deniz suyunda bulunan MgSO₄, Ca(OH)₂ ve C₃A'dan ayrıca kalsiyum-silikat-hidrateler ile de etkileşime girer. Reaksiyon denklem 2.12'deki gibi gelişir:



Burada ortaya çıkan magnezyum hidroksitin çözünürlüğü çok düşüktür. Buna rağmen, çimento hamurundaki CSH yapısı bozulana kadar reaksiyonu devam ettirmektedir (Göktepe, 2008; Eren, 2016).

Sülfatlı ortamlarda yapılacak betonarme yapılarda C₃A içeriği yüksek çimentonun kullanılması uygun değildir. TS EN 197-1 (2002) standarda çimento

tiplerinin birleşim özellikleri ve uygunluk kriterleri belirlenmiştir. Bu standarda göre sülfat ortamlarında kullanılan sülfata dayanıklı çimentonun C_3A miktarı %5'ten fazla olmamalıdır (Doğan, 2008).

2.9. Sülfat Reaksiyonlarının Gelişimini Etkileyen Parametreler

Sülfat tuzları katı haldeyken betona zarar vermez. Ancak, nemli ortamda oldukları zaman bir takım reaksiyonları gerçekleştirir. Bu reaksiyonların gelişimini sağlayan parametreler ise aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Sülfat içeriği, ortam koşulları
- Betonun, özellikle çimentonun yapısı
- Betonun geçirimsizliği
- Suyun varlığı, nem ortamı

2.9.1. Sülfat içeriği

Sülfat iyonlarının varlığından kaynaklanan betonun bozulmasına ilişkin araştırmalar yıllardır devam etmektedir. Betonun yeraltı surlarında, özellikle deniz ortamındaki dayanıklılığı, bir asırdır mühendislerin ve bilim adamlarının dikkatini çekmiştir. Deniz suyu litre başına yaklaşık 2800–3000 mg sülfat içerir ve bu iyonlar betona girdiklerinde, kalsiyum hidroksit çözeltisini reaksiyona sokarlar ve gecikmiş etrenjiti (katı etrenjit) oluştururlar. Bu da, çimento harcının mikro boşluklarını doldurarak bir genişleme kuvveti oluşturur. Genişleme kuvvetinin etkisi altında, mikro çatlakların çekirdeklenmesi ve büyümesi betonlarda parçalanmalara ve dağılmalara sebep olur. Etrenjit ve alçıtaşı ile kimyasal aşınmanın önlenmesi, esas olarak C_3A , C_3S içeriğinin sınırlandırılması, mineral katkıların eklenmesi ve diğer yöntemlerin kontrol edilmesiyle sağlanabilir (Benli ve ark., 2017).

Sülfatlar, kalsiyum silikat hidrat (CSH), kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ve kalsiyum alüminat hidratlar (C_3A) gibi bağlayıcı maddenin hidrasyon ürünleri ile kimyasal olarak bağlanır.

Alçıtaşı, $Ca(OH)_2$ veya CSH, sülfat ve sudan oluşan bir reaksiyon ürünüdür. Genellikle alçıtaşı oluşumunun sertlik ve mukavemet azalmasına, genişlemeye ve çatlamaya ve nihayetinde malzemenin yapışkan olmayan bir kütleye dönüştürülmesine yol açtığı varsayılır. Ek olarak, ikincil etrenjit, SO_4^{2-} , Ca^{2+} ve mono sülfat (C_4ASH_{12}) arasındaki reaksiyondan meydana gelir. Kuvvetli bir şekilde kabarma kabiliyetine

sahiptir ve bu, betonun çatlamasına ve tahrip olmasına yol açar. Ayrıca, tomazitin oluşması formasyonu, güç kaybına ve mikro yapının bozulmasına neden olur. Tomazit, sülfatların veya etrenjitin CSH, CO_3^{2-} , Ca^{2+} ve fazla suyla reaksiyona girmesi ile oluşur. Genellikle, tomazitin 15 °C'nin altındaki sıcaklıklarda olduğu varsayılır (Maes ve De Belie, 2017).

Dış sülfat atağı ise, büyük ölçüde erişilebilir gözeneklilik, betonun gözenekli mikro yapısı ve geçirgenliği, betonla temas eden dış ortamdaki sülfat konsantrasyonu ve betonun C_3A içeriğinden büyük ölçüde etkilenir. Sırasıyla, bu faktörler katyon tipinden, pH'dan ve ortamın sıcaklığından etkilenir. Katyon tipiyle ilgili olarak, OH^- konsantrasyonunu da etkilediği görülür. Örneğin. Na_2SO_4 ve MgSO_4 , gözenek çözeltisinin alkalitesi üzerinde zıt etkilere sahiptir. Na_2SO_4 alkaliteyi artırırken MgSO_4 bunu azaltır (De Weerd ve ark., 2014).

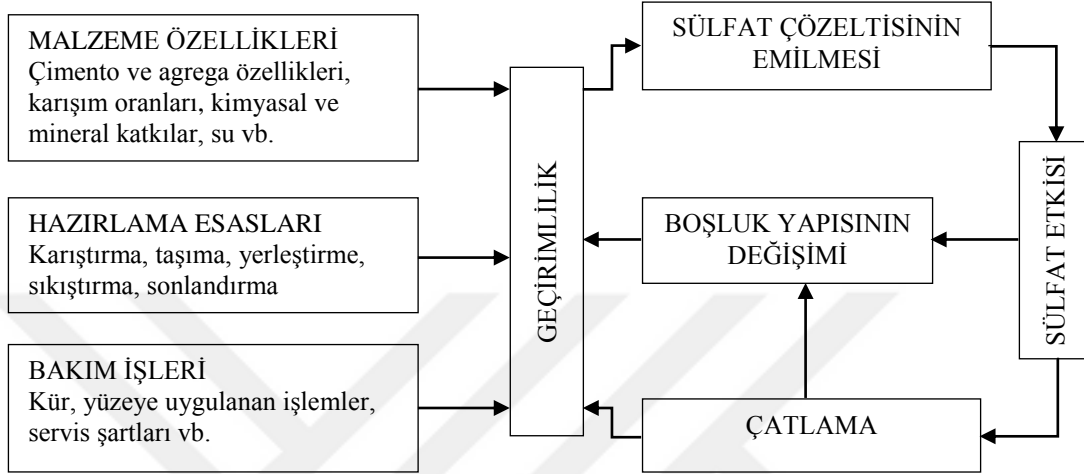
2.9.2. Çimentonun yapısı

Çimentonun kimyasal bileşimi, özellikle C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)'nin bulunması reaksiyon gelişimine sebep olan önemli bir faktördür. C_3A çimento ve suyun arasında gerçekleşen hidrasyonda çözünüp, yüksek miktarda ısı açığa çıkarmaktadır. Klinkerin öğütülmesi esnasında alçıtaşı katılarak C_3A 'ın hidrasyon hızını dengeler. C_3A 'lı bir çimento, alçıtaşı ilave edilmemesi halinde hızla katılaşmaktadır. Düşük C_3A oranına sahip çimentolar özellikle sülfat içeren su ve zemine karşı dayanımı yüksektirler. C_3A oranının yüksek olması durumunda dış ortamda bulunan sülfatlar betona nüfuz ederek C_3A ile reaksiyona girer ve neticede beton ciddi problemlere karşılaşılabılır (TS EN 197-1, 2002). Bu nedenle, ASTM standartlarda maksimum %8 C_3A içeren çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı ve maksimum %5 C_3A içeren çimentoları sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak sınırlandırılmaktadır. Bu sınır Avrupa'da ise, maksimum C_3A miktarı %3 olarak kabul edilmektedir (Ilıca, 2008).

2.9.3. Betonun geçirimliliği

Beton yapısında boşlukların oluşması betonun geçirimliliğini doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu boşluklar çeşitli sebeplerle oluşabilir. Kapiler boşluklar, sürüklenmiş hava kabarcıkları, taze betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi sırasında oluşan hapsoluş hava kabarcıkları veya agrega tanelerinin bünyesinde bulunabilecek boşluklar betonun geçirimliliğine büyük bir etkisi vardır. Betonun sülfata dayanıklılığı

da büyük oranda diğer problemlerde olduğu gibi geçirimsizliğe bağlıdır. Sülfat saldırısına maruz kalmış betonun reaksiyonlar neticesinde boşluk yapısı değişerek betonda çatlaklar oluşur. Bu durum, betonun geçirimsizliğini daha çok arttırarak bozulma ve yıpratma sürecini hızlandırır. Şekil 2.4'te sülfat etkisi ve betonun geçirimsizliği arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Betonda sülfat etkisi ve geçirimsizlik arasındaki ilişki (Göktepe, 2008)

2.9.4. Nem ortamı

Çimentonun kimyasal yapısı ve dozajı, betonun geçirimsizliğine ve dayanıklılığına önemli bir etkisi olduğu gibi S/Ç oranı da bir o kadar önemlidir. Su, sülfat reaksiyonlarını gerçekleştirmesinin yanı sıra sülfat iyonlarını beton içerisindeki boşluklara da taşınmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, beton yüzeyine temas eden yer altı sularını drene ederek temasını önlemek veya temel gibi yapıları kuru tutmak için reaksiyonun gelişimini önlemek etkili bir yoldur (Uygunoğlu ve ark., 2006).

2.10. Sülfat Saldırısına Karşı Alınacak Önlemler

Betonun sülfat saldırısına başlıca önlemleri; sülfata dayanıklı çimento kullanılması, kimyasal katkı kullanılması, puzolanik özellikte mineral katkı kullanılması, daha geçirimsiz beton üretilmesi, gerektiğinde betonun kaplamalar ile dıştan sülfatlara karşı izole edilmesi, çok şiddetli etki durumlarında minimum 360 kg/m² çimento kullanılması, en yüksek S/Ç oranı 0.45 olarak alınması gibi işlemlerle özetlemek mümkündür (Kuyumcu, 2006).

Bu konu ile ilgili öneriler ACI 318 ve TS EN 206 standartlarında sülfat ortamlarına göre çimento kullanımı ve betonun S/Ç oranı hangi seviyede olması gerektiği kısaca özetlenmiştir (Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3). Ancak, standartlarda belirtilen kriterler betona temas eden durgun ve hareketsiz sular için geçerlidir. Sülfatların etkinlik derecesi mekanik olaylarla artmaktadır. Mekanik etki olarak ıslanma kuruma olayları, sıcaklığın artması, sürtünme ve donma çözülme gibi olaylardan söz edilebilir.

ACI standardında Çizelge 2.2’de sülfatın etki derecesine göre sınıflandırılmıştır. Burada sudaki sülfat konsantrasyonu, mg/l veya ppm (part per million) cinsinden, zemindeki sülfat miktarı ise % olarak ifade edilir.

Çizelge 2.2. ACI standardına göre sülfat etki derecesinin sınıflandırılması ve bu ortamdaki betonun kullanım şartları (Göktepe, 2008)

| Sülfat ortamı, Etki derecesi | Zemindeki SO ₄ ²⁻ miktarı (%) | Sudaki SO ₄ ²⁻ miktarı (mg/l) | Kullanım şartı | |
|---------------------------------|---|---|--|-------------------|
| | | | Çimentonun C ₃ A oranı (%) | Betonun S/Ç oranı |
| İhmal edilebilir | 0.0-0.1 | 0-150 | - | - |
| Orta şiddetli | 0.1-0.2 | 150-1500 | 8’in altında | 0.5’in altında |
| Şiddetli | 0.2-2.0 | 1500-10000 | 5 ve altında | 0.45’in altında |
| Çok şiddetli | 2.0 ve üstü | 10000 ve üstü | 5’in altında | 0.5’in altında |

Betonun, tabii zeminler ve yeraltı suyundan kaynaklanan zararlı kimyasal etkilere maruz kalması durumunda, TS EN 206 standardına göre çimento kullanımı ve betonun S/Ç oranının verilen sınır değerleri geçmemelidir. TS EN 206 standardında, sülfat iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri Çizelge 2.3’te sınıflandırılmıştır. Çevresel koşullar değişken olması nedeni ile betonun kullanılacağı yerde geçerli sınıflandırma uygulanır.

Çizelge 2.3. TS EN 206’da betonun zararlı kimyasal etki durumuna göre sınır değerler (Göktepe, 2008)

| Sülfat ortamı | Suda SO ₄ ²⁻ (mg/l) | Zeminde SO ₄ ²⁻ (mg/kg) | Kullanım şartı | | |
|---------------|--|--|--------------------|-------------------------|--|
| | | | En büyük S/Ç oranı | En küçük dayanım sınıfı | En az çimento içeriği (kg/m ³) |
| Az zararlı | 200-600 | 2000-3000 | 0.55 | C30 | 300 |
| Orta zararlı | 600-3000 | 3000-12000 | 0.50 | C30 | 320 |
| Çok zararlı | 3000-6000 | 12000-24000 | 0.45 | C35 | 360 |

Bu standarda göre az zararlı kimyasal etki durumunda, sülfata dayanıklı çimentonun kullanılması zorunlu değil, fakat önerilebilir. Orta zararlı kimyasal etki durumunda ise sülfata orta derecede dayanıklı ($C_3A < 8\%$) ve çok zararlı sülfat ortamı için sülfata yüksek derecede dayanıklı ($C_3A < 5\%$) çimentonun kullanılması şart kılınmaktadır.

Betonun şiddetli kimyasal etki durumlarında C_3A ve $Ca(OH)_2$ içeriğinin sınırlandırılması ile yetersiz kalırsa sülfata dayanıklı çimentonun yanı sıra uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkı maddelerin de kullanımı önerilebilir. Çünkü puzolanik katkılar $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak sülfatlar ile reaksiyonun girmesini engeller (Uygunoğlu ve ark., 2006; Göktepe, 2008; Eren, 2016).

Betonu sülfat saldırısından korumak için puzolanik özellikte mineral katkı maddeleri kullanmak etkili bir yöntemdir. Birçok araştırmacı, çimentonun kısmen silika dumanı ile yer değiştirilerek betonun sülfat saldırısına karşı direncini arttırdığını bildirmiştir. Bu yararlı etki, alçı ve etrenjit için gerekli olan $Ca(OH)_2$ ve alüminatın azalmasına ve gözenek yapısının iyileştirilmesine sebep olur (Benli ve ark., 2017). Aynı zamanda birçok araştırmaya göre, betonun sülfat saldırısına karşı direncini artırmak için yeterli miktarda uçucu külün kullanılması, özellikle düşük kalsiyumlu veya F sınıfı uçucu kül betonun sülfat saldırısına karşı direncini etkin bir şekilde artırabileceğinin sonucuna varmıştır.

Betonarme yapıları zemindeki zararlı kimyasal ortamlardan korumanın bir diğer yolu da kaplama tekniğidir. Çok şiddetli sülfat saldırısında kalan yapılar bu teknik ile yapının her tarafı geçirimsiz bir malzemeyle kaplanır. Bu yöntemde, betonun dış yüzeyi sülfata dayanıklı malzemeler, polimer kaplamaları veya bitüm gibi malzemeleri kullanılarak izole edilebilir, diğer taraftan suyun yapıya ulaşmaması için drenaj kanalları açılarak beton korunabilir.

2.11. Silis Dumanı

Silis dumanı, silikon metal veya silikon alaşımları imalatında kullanılan elektrikli fırınlardan elde edilen bir üründür. Silis dumanının betonda birçok olumlu etkileri vardır. Betonda yüksek basınç dayanımının sağlanması, betonun hidrasyon ısısının azaltılması, sertleşmiş betonda su geçirimsizliğinin ve taze betonda terlemenin ve ayrışmanın azaltılması ve yüksek sülfat direncine sahip olması gibi olumlu etkilerinden ve avantajlarından söz edilebilir. Bu avantajlar, silis dumanı parçacıklarının yüksek

spesifik yüzey ve puzolanik aktivitesinden kaynaklanmaktadır. Fakat, silis dumanı çok ince taneli olması nedeni ile beton üretiminde yüksek miktarda karışım suya ihtiyaç bulunmaktadır. Bu durum ise su azaltıcı katkı ile telafi edilebilir (Akçaözoğlu, 2007; Sezer, 2012).

Silis dumanı kullanmanın temel avantajları: daha yüksek mekanik mukavemet (yüksek erken basınç dayanımı, yüksek gerilme dayanımı, yüksek eğilme dayanımı ve elastisite modülü), sülfat direnci, daha yüksek elektriksel direnç, düşük klorür geçirgenliği ve kimyasal saldırıya karşı direnç, deniz suyu direnci, donma-çözülme direnci, aşınma direnci, alkali-silika reaksiyonu nedeniyle genleşme kontrolü ve iyi yangın dayanımına sahip olmasıdır (Sanjuan ve ark., 2015).

Silis dumanı iyi bir bağlayıcı maddesi olarak çimento ile yer değiştirerek betona eklenmektedir. Literatür çalışmalarına bakıldığında, silis dumanın çimento ile %10 ve %15 gibi oranlarda yer değiştirerek kullanılması tavsiye edilmektedir.

Beton teknolojisinin şu anki aşamasında, silis dumanın %10'u aşan ilave konsantrasyonların nadiren kullanıldığı ve sağduyunun ideal konsantrasyonların %5 - %10 aralığında olduğunu belirttiği vurgulanmaktadır (Kulakowski ve ark., 2009).

Silis dumanı içeriği artmasıyla harcın hava içeriği ve işlenebilirliği azalmaktadır (Gündeşli, 2008). Duval ve Kadri (1998), silis dumanının %10'a kadar çimento ile yer değiştirmesi betonun işlenebilirliğini azaltmadığını belirtmiştir. %20'ye kadar değişim içeriklerinde bulunan silis dumanı, optimum basınç dayanımı sağladığını tespit etmiştir (Duval ve Kadri, 1998). Silis dumanı betonun basınç dayanımını artırmanın yanı sıra, çelik takviyenin korozyona karşı korunmasında da etkili olmaktadır. Dotto ve ark. (2004), tarafından yapılan çalışmada, farklı silis dumanı ilavelerinin (%0, %6 ve %12) gözeneklilik, elektriksel direnç ve çeliğin silis dumanı içeren ve içermeyen betondaki korozyon davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %6 silis dumanı ilavesi betonun elektriksel direncini 2.5 kat, %12 silis dumanı ise bunu 5 kat arttırdığını göstermiştir (Dotto ve ark., 2004).

Zhang ve ark. (2018), tarafından yapılan çalışmada, beton geçirimsizliğinin artırılması için, harç yüzeyinde yeni bir tür çimento esaslı malzemenin kaplanması denenmiştir ve ara yüz performansı da dikkate alınmıştır. Bu yeni inorganik yüzey koruma malzemesi, nano silika ve silika dumanı tarafından modifiye edilmiş çimento harcı ile hazırlanmıştır. Sonuç olarak, yüksek aktivite ve mükemmel doldurma etkisine bağlı olarak nano silika ve silika dumanı, hidrasyon ürünlerinin mikro yapısını önemli ölçüde geliştirmiş, gözenek yapısını iyileştirmiş ve ara yüzey geçiş bölgesini

yoğunlaştırmıştır ve böylece basınç dayanımı ve geçirimsizliğinde artış sağlamıştır (Zhang ve ark., 2018).

2.11.1. Silis dumanının karbonatlaşmaya olan etkisi

Mineral katkı maddelerin kullanılmasının birçok araştırmacı tarafından beton içerisindeki mikro boşlukların kapatılmasında etkili olduğu belirtilmektedir. Daha yoğun mikro yapıya sahip beton oluştuğunda, beton daha az geçirgen hale gelir, betonun dayanımı ve dayanıklılığı artar ve CO₂'in betona girmesi zorlaşır. Böylece betonun karbonatlaşması uzun zaman alır.

Mineral katkıları arasında silis dumanı, çimentodan çok daha ince olması nedeni ile hem çimento ve agrega arasındaki bağı kuvvetlendirerek mikro boşlukları en aza indirip, betonun geçirimsizliğini ve dayanıklılığını artırır hem de içerdiği aktif silis sayesinde hidrasyon ürünlerinden Ca(OH)₂'yi bağlayarak betonun kimyasal direncini yükseltmektedir (Şimşek ve Sancak, 2005; Topçu ve Canbaz, 2008).

Khan ve Lynsdale, (2002), tarafından yapılan çalışmada, çimento yerine %8-12 silis dumanının dahil edilmesi, optimum mukavemet ve geçirgenlik değerleri sağladığı belirlenmiştir (Khan ve Lynsdale, 2002).

Salvoldi ve ark. (2015), tarafından yapılan hızlandırılmış karbonatlaşma testinde, normal portland çimentosu, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı katkı maddeleri kullanılmıştır. Bu katkıları arasında silis dumanının karbonatlaşmayı azaltma yönünde en etkili olduğu olmuştur (Salvoldi ve ark., 2015).

Kulakowski ve ark. (2009), bu çalışmada, beton numunelerde silis dumanı eklenmesi ile karbonatlaşma süreçleri ve karbonasyon kaynaklı donatı korozyonu değerlendirilmiştir. Silis dumanı konsantrasyonu %10'u aştığında, sadece karbonasyon derinliğini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda, özellikle daha yüksek su/bağlayıcı oranları için, karbonasyon kaynaklı korozyon yoğunluğundaki değişimi de arttırdığı tespit edilmiştir (Kulakowski ve ark., 2009).

Özcan ve Atiş (2017), çalışmasında, %10 ve %15 oranlarındaki silis dumanı karbonatlaşma miktarlarını düşürürken, %40 oranında ise, karbonatlaşma miktarlarını arttırdığını belirtmiştir (Özcan ve Atiş, 2017). Silis dumanı aslında tartışmalı bir konudur, yüksek oranlarda kullanılması karbonatlaşmaya ve kimyasal etkilere olumsuz etki gösterirken, düşük oranlarda kullanılması betona birçok olumlu özellik katar. Genel anlamda literatüre baktığımızda %8-15 oranlarında silis dumanının kullanılması hem

beton dayanımı ve dayanıklılığı açısından hem de karbonatlaşma ve sülfat direnci açısından uygun olduğu gösterilmektedir.

2.11.2. Silis dumanının sülfatlara karşı direnci

Silis dumanı, sülfatlara karşı özellikle sodyum sülfata karşı oldukça etkili bir malzemedir. Fakat magnezyum sülfata karşı genel olarak olumsuz bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda silis dumanının amonyum sülfata karşı direnci olumlu olduğu söylenir. Araştırmalara göre, çimento yerine %10-15 oranlarında silis dumanının kullanılması, betonda sülfatlara karşı direnci artırır (İlter, 2007; Gündeşli, 2008).

Magnezyum sülfat çözeltisindeki tüm harç karışımlarının genişmesi, sodyum sülfat çözeltilerinden daha yüksektir. Bunun nedeni, magnezyum iyonunun hidratlanmış portland çimentosundaki kalsiyumun yerini alabilmesidir. Dolayısıyla magnezyum sülfat, sodyum sülfata kıyasla potansiyel olarak daha tahrip edicidir. Magnezyum sülfat yüksek ölçüde çözünür ve sonuçta sodyum sülfattan daha yüksek konsantrasyonda sülfat çözeltileri oluşturur. Bu muhtemelen harçların yüksek magnezyum sülfat genişmesinin bir başka nedenidir (Sezer, 2012). Magnezyum sülfat diğer sülfatlardan daha tehlikelidir. Günümüzde, silis dumanı kullanımının, betonun magnezyum sülfata dayanıklılığı üzerinde kötü bir etkiye sahip olduğu neredeyse kanıtlanmıştır.

Magnezyum sülfat saldırısında, silis dumanlı yüksek mukavemetli beton numuneleri, basınç mukavemetinde azalma göstermektedir. Silis dumanlı yüksek dayanımlı betonun sodyum sülfat saldırısına karşı en etkili olmasına rağmen, silis dumanının içeriği arttıkça magnezyum sülfat saldırısına karşı direnci düşmektedir. Daha yüksek silis dumanı karışımlarında, sodyum sülfat çözeltisinde daha az doğrusal genişleme meydana gelirken magnezyum sülfat çözeltisinde daha fazla doğrusal genişleme meydana gelir (Diab ve ark., 2012).

2.11.3. Silis dumanının beton basınç dayanımına etkisi

Betona silis dumanının ilave edilmesi, mikro boşlukların kapatılması nedeniyle beton basınç dayanımı artmaktadır. Silis dumanı diğer puzolanların olduğu gibi CH'i bağlayarak CSH jeli oluşturmasının yanı sıra agrega-hamur ara yüzey bölgesini güçlendirerek betonun serbest basınç dayanımını artırmaktadır (İlter, 2007; Topçu ve Canbaz, 2008). Silis dumanının uçucu kül ile kullanılması çok daha yoğun bir mikro yapı ile sonuçlandığı ve böylece sıkıştırma kuvvetinde bir artışa yol açtığı

gösterilmektedir (Nochaiya ve ark., 2010). Mohamed (2011), tarafından yapılan çalışmada, %10 silis dumanı ve %10 uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen beton, en yüksek basınç dayanımı değerini vermiştir (Mohamed, 2011). Akçaözoğlu'nun çalışmasına göre, çimento yerine %10-20 oranlarında silis dumanının kullanılması maksimum basınç dayanımını verir. Fakat, su-bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımı düşer (Akçaözoğlu, 2007). Silis dumanı, betonun basınç ve çekme dayanımını artırmasının yanı sıra durabilite ve geçirimsizlikte de oldukça önemli gelişmeler sağlayabilmektedir (Atiş ve ark., 2004).

Yüksek inceliğe sahip silis dumanın, EN 197-1: 2011 Avrupa Standardına göre yüksek kaliteli, dayanıklı ve yüksek performanslı beton üretiminde CEM II / A-D çimentosunun %10'dan daha düşük silis dumanı yüzdelerinde yapılmasında kullanım için uygun olduğunu göstermektedir (Sanjuan ve ark., 2015).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyaller

Bu tez çalışması kapsamında, agregalar Darbazlar Madenciliğe ait Konya Sancak Hazır Beton santralinden 0-4 mm, 4-11.2 mm ve 11.2-22.4 mm tane boyutlu olarak alınmıştır. Çimento ise Çin'den temin edilen ince taneli çimento (DMFC-800) kullanılmıştır. Silis dumanı Antalya Eti Elektrometalürji.A.Ş.'den ve mikro fiber donatısı Antalya Kordsa firmasından temin edilmiştir. Beton karışımlarındaki S/Ç oranı 0.65 olarak sabit alınmış ve karışım suyu olarak Konya Sancak Hazır Beton santralindeki şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1. Agrega özellikleri

Beton karışımında kullanılan agregalar, Darbazlar madenciliğe ait Konya Sancak Hazır Beton tesisatından temin edilmiştir. Agregalar; %50 ince (0-4 mm), %25 orta (4-11.2 mm) ve %25 iri (11.2-22.4 mm) olmak üzere üç sınıfa ayrılarak kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan kırma taş agregaya ait tane dağılımı, TS 706 EN 12620'e göre ve Agreganın elek analizi, TS 3530 EN 933-1 standardına uygun şekilde belirlenmiştir. Burada ince agrega oranının bir miktar fazla seçilmesi beton işlenebilirliğinin kolaylaşması açısından alınmıştır. Agrega elek analizi Çizelge 3.1 (0-4 mm), Çizelge 3.2 (4-11.2 mm), ve Çizelge 3.3 (11.2-22.4 mm)'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. (0-4 mm) kırma kum elek analizi

| Elek (mm) | Elekte kalan (gr) | Kümülatif ağırlık (gr) | Her elekte kalan (%) | Kümülatif | |
|-----------|-------------------|------------------------|----------------------|-----------|---------|
| | | | | % kalan | % geçen |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100 |
| 4 | 10.0 | 10.0 | 0.9 | 0.9 | 99 |
| 2 | 245.0 | 255.0 | 22.0 | 22.9 | 77 |
| 1 | 263.0 | 518.0 | 23.6 | 46.5 | 54 |
| 0.5 | 185.3 | 703.3 | 16.6 | 63.1 | 37 |
| 0.25 | 165.2 | 868.5 | 14.8 | 77.9 | 22 |
| 0.125 | 125.3 | 993.8 | 11.2 | 89.2 | 11 |
| 0.063 | 85.3 | 1079.1 | 7.7 | 96.8 | 3 |
| pan | 35.3 | 1114.4 | 3.2 | 100.0 | 0 |

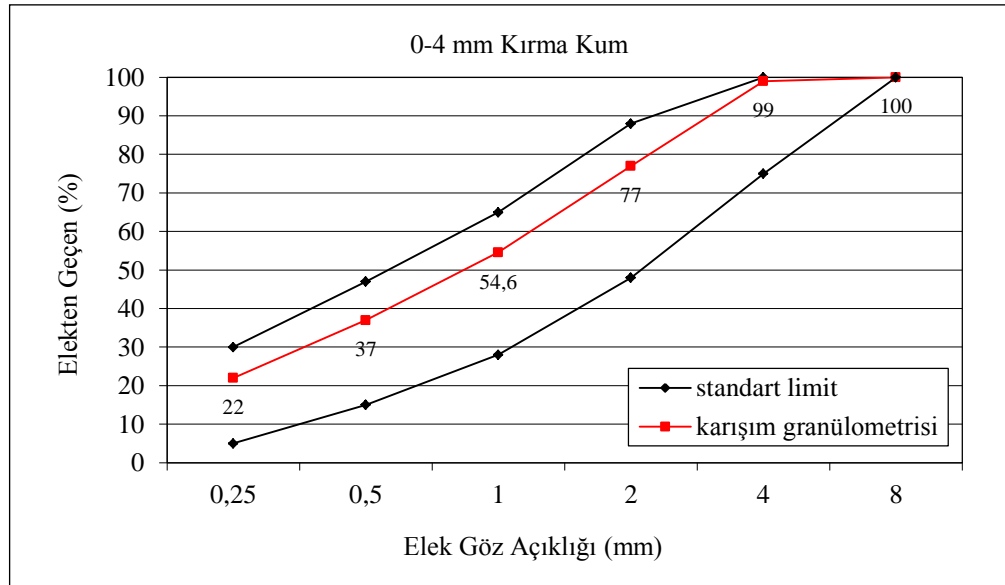
Çizelge 3.2. (4-11.2 mm) I.nolu agrega elek analizi

| Elek (mm) | Elekte kalan (gr) | Kümülatif ağırlık (gr) | Her elekte kalan (%) | Kümülatif | |
|-----------|-------------------|------------------------|----------------------|-----------|---------|
| | | | | % kalan | % geçen |
| 16 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100 |
| 11.2 | 25.0 | 25.0 | 2.0 | 2.0 | 98 |
| 8 | 400.0 | 425.0 | 32.4 | 34.4 | 66 |
| 5.6 | 375.0 | 800.0 | 30.0 | 64.7 | 35 |
| 4 | 300.2 | 1100.2 | 24.3 | 89.0 | 11 |
| 2 | 125.3 | 1225.5 | 10.1 | 99.2 | 1 |
| pan | 10.2 | 1235.7 | 0.8 | 100.0 | 0 |

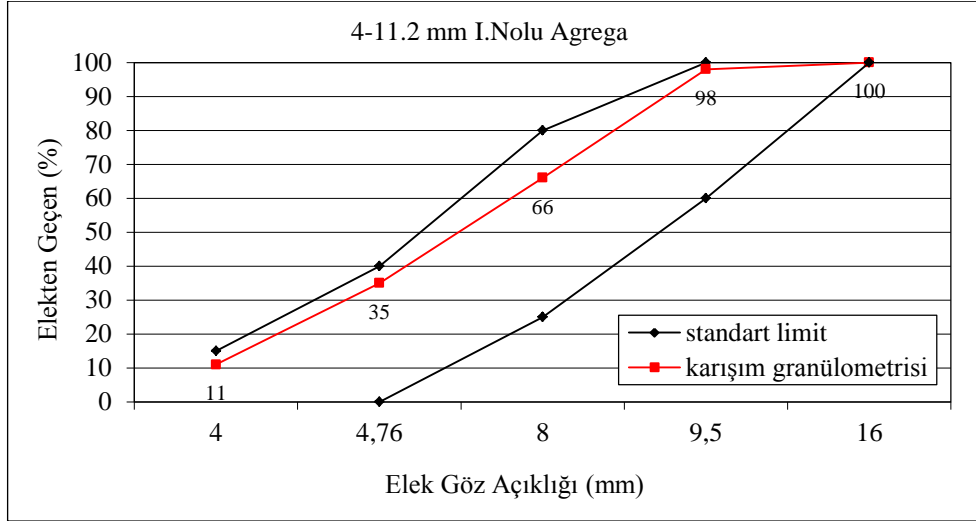
Çizelge 3.3. (11.2-22.4 mm) II.nolu agrega elek analizi

| Elek (mm) | Elekte kalan (gr) | Kümülatif ağırlık (gr) | Her elekte kalan (%) | Kümülatif | |
|-----------|-------------------|------------------------|----------------------|-----------|---------|
| | | | | % kalan | % geçen |
| 22.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100 |
| 16 | 465.0 | 465.0 | 46.5 | 46.5 | 54 |
| 11.2 | 520.0 | 985.0 | 52.0 | 98.5 | 2 |
| 9.5 | 0.0 | 985.0 | 0.0 | 98.5 | 2 |
| pan | 15.0 | 1000.0 | 1.5 | 100.0 | 0 |

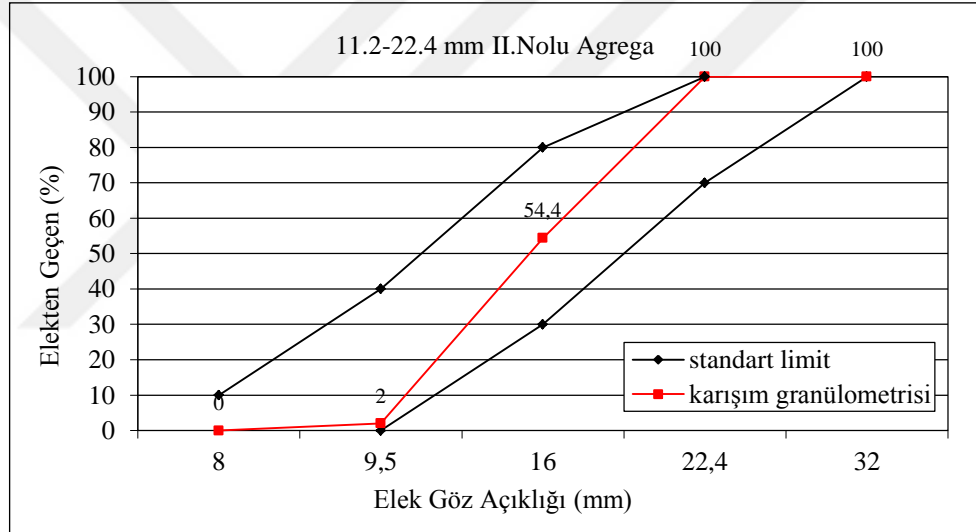
Agrega elek analiz grafikleri sırasıyla Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3'te ve görünümü Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1. (0-4 mm) Kırma kum elek analizi grafiği



Şekil 3.2. (4-11.2 mm) I.nolu agrega elek analizi grafiği



Şekil 3.3. (11.2-22.4 mm) II.nolu agrega elek analizi grafiği



Şekil 3.4. Yapılan deneyde kullanılan agregalar: (a) 11.2-22.4 mm, II.nolu agrega (b) 4-11.2 mm, I.nolu agrega (c) 0-4 mm, kırma kum

3.1.2. Çimento özellikleri

Bu çalışmada, Çin'den temin edilen DMAR markalı ince taneli çimento (DMFC-800) kullanılmıştır. İnce taneli çimento (DMFC-800), ultra ince parçacıklardan oluşan yüksek fırın cüruf bazlı çimentolardır ve gevşek toprak, kaya ve betona enjeksiyon için tasarlanmıştır. Çizelge 3.4'te fiziksel ve mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.4. İnce taneli çimentonun (DMFC-800) fiziksel özellikleri

| Analiz | Deneyler | Değer |
|----------|-----------------------------------|-------|
| Fiziksel | Yoğunluk (gr/cm ³) | 3 |
| | Özgül yüzey (cm ² /gr) | ≥ 800 |
| | Görünüm | Gri |
| | Koku | Yok |
| | Piriz başlangıç süresi (dak) | 120 |
| | Piriz final süresi (dak) | 150 |
| Mekanik | 3. gün (MPa) | 25 |
| | 7. gün (MPa) | 45 |
| | 28. gün (MPa) | 60 |

3.1.3. Silis dumanı özellikleri

Çalışmada mineral katkı maddesi olarak Antalya Eti Elektrometalürji firmasından sağlanan silis dumanı (SiFeCr) kullanılmıştır. Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Çalışmada kullanılan silis dumanının özellikleri

| Kimyasal özellikler (%) | | Fiziksel özellikler | |
|--------------------------------|-------|---------------------|-------------------------|
| SiO ₂ | 79.94 | Özgül ağırlık | 5.21 gr/cm ³ |
| Cr ₂ O ₃ | 0.38 | Erime noktası | 1.495 °C |
| Fe ₂ O ₃ | 0.41 | Elek analizi (mm) | |
| Al ₂ O ₃ | 0.83 | +0.250 | 0.18 |
| CaO | 2.53 | +0.125 | 0.73 |
| MgO | 7.68 | +0.074 | 0.57 |
| C | 1.22 | +0.044 | 1.14 |
| S | 0.923 | -0.044 | 97.38 |
| Ateş kaybı | 2.96 | | |

3.1.4. Mikro fiber özellikleri

Çalışmada kullanılan mikro fiber, Antalya Kordsa firmasından temin edilmiştir. Mikro fiber, Poliamid 6.6 ham maddesinden EN 14889-2 Sınıf 1 standardında üretilen,

taze betonda plastik ve uzun dönemli kuruma rötresi çatlaklarını önlemede kullanılan sentetik fiber donatıdır. Kordsa firmasından alınan mikro fibere ait teknik özellikleri Çizelge 3.6’da ve görünümü Şekil 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.6. Mikro fiberin karakteristik özellikleri

| Mikro fiber | Karakteristik özellikleri |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Fiber sınıfı | EN 14889-2 sınıf I |
| Ham madde | Poliamid 6.6 |
| Özgül ağırlık (gr/cm ³) | 1.14 |
| Uzunluk (mm) | 6 , 12 |
| Çekme gerilmesi (MPa) | 970 |
| Alkali direnci | Çok iyi |
| Korozyon direnci | Çok iyi |
| Erime sıcaklığı (°C) | 260 |



Şekil 3.5. Mikro fiber görünümü

3.1.5. Karışım suyu özellikleri

Bu çalışmada beton karışım suyu olarak, Sancak Hazır Beton santraline ait şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan beton karma suyu ile ilgili laboratuvar analiz sonuçları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Beton karışım suyunun özellikleri

| Parametreler | Birim | Analiz sonuçları | TS EN 1008, beton karma suyu niteliği standardı |
|---------------------------|--------------|-------------------------|--|
| Elektriksel iletkenlik | µs/cm | 1824 | - |
| Klorür (Cl) | mg/l | 162.07 | 500 |
| Nitrat (NO ₃) | mg/l | 7.025 | 500 |
| pH | - | 7.50 | > 4 |
| Sülfat (SO ₄) | mg/l | 391.8 | 2000 |

3.1.6. Kimyasal katkı maddenin özellikleri

Bu deneysel çalışmada, kimyasal katkı maddesi olarak Sefer Conslumper 4365, karboksilik eter polimerlerinden oluşan, yeni nesil beton hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çizelge 3.8’de katkıının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.8. Conslumper 4365, hiper akışkanlaştırıcı katkıının özellikleri

| Malzeme yapısı | Değer |
|--------------------------------|-----------------|
| Renk | Koyu kahverengi |
| Yoğunluk (gr/cm ³) | 1.053 |
| Katı madde (mg/l) | 19.35 |
| pH | 5 |
| Uygunluk | TS EN 934-2 |

3.2. Metod

3.2.1. Beton karışımın hazırlanması ve beton üretimi

Bu çalışmada agrega, ince taneli çimento, silis dumanı ve mikro fiber ile farklı beton karışımları elde edilmiştir. Silis dumanı ağırlık bazında %0, %5, %10 ve %15 oranlarında ince taneli çimento yerine betona eklenmiştir. Kordsa firmasından temin edilen mikro fiber, rötre çatlaklarını önlemek amacıyla her bir metre küp için 600 gr kullanılmıştır. Ayrıca, kimyasal katkı maddesi olarak beton akış kapasitesini arttırmak ve viskoziteyi geliştirmek amacıyla Sefer Conslumper hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agrega oranları ise sırasıyla, %50 ince (0-4 mm), %25 orta (4-11.2 mm) ve %25 iri (11.2-22.4 mm) olarak ayarlanmıştır. Çizelge 3.9’da üretilen 8 grup betonun karışım oranlarının kısaltmış isimlendirmeleri verilmiştir.

Çizelge 3.9. Beton numunelerin kodlanması

| Seriler | Kodlar | Açıklamalar |
|---------|----------------------|---|
| 1 | SD ₀ B | Silis dumanı ve mikro içermeyen beton (referans betonu) |
| 2 | SD ₅ B | %5 Silis dumanlı ve mikrosuz beton |
| 3 | SD ₁₀ B | %10 Silis dumanlı ve mikrosuz beton |
| 4 | SD ₁₅ B | %15 Silis dumanlı ve mikrosuz beton |
| 5 | SD ₀ kmB | Silis dumanı içermeyen ve mikro içeren beton |
| 6 | SD ₅ kmB | %5 Silis dumanlı ve mikro katkılı beton |
| 7 | SD ₁₀ kmB | %10 Silis dumanlı ve mikro katkılı beton |
| 8 | SD ₁₅ kmB | %15 Silis dumanlı ve mikro katkılı beton |

Beton karışım hesap esasları TS 802 standardına göre yapılmıştır. Karışımlarda C25/30 beton sınıfı baz alınarak her bir grup ve yaş için 3'er adet 15cm x15cm x15cm ebatlı küp numuneler hazırlanmıştır. Beton numuneler, 4 farklı kür uygulaması için 3'er adet 28 günlük, 56 günlük ve 90 günlük hazırlanmıştır. Numuneler sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisi deneyi için 28 ve 90 gün, karbonatlaşma deneyi için 28 ve 56 gün ve şahit numuneler ise 28 gün ilgili ortamlarda kür edilmek üzere üretilmiştir. 1m³ beton içinde bulunan malzeme miktarı Çizelge 3.10'da verilmektedir.

Çizelge 3.10. 1m³ beton için karışım miktarları

| Malzemeler | Hacim (dm ³) | γ_c (gr/cm ³) | Kütle (kg) |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------|
| (0-4 mm) Agrega %50 | 323.3 | 2.66 | 860 |
| (4-11.2 mm) Agrega %25 | 159.3 | 2.70 | 430 |
| (11.2-22.4 mm) Agrega %25 | 158.7 | 2.71 | 430 |
| DMFC-800 | 88.3 | 3 | 265 |
| Su | 170 | 1 | 170 |
| Hava | 10 | - | - |
| Katkı | 2.01 | 1.053 | 2.12 |

Numunelerin hazırlanması için 22 dm³ kapasiteli mikser kullanılmıştır. Beton karışımında kullanılan mikserin kapasitesine göre 22 dm³ olacak şekilde 6'şer numune karıştırılarak üretilmiştir. 22 dm³ beton için karışım miktarları Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. 22 dm³ beton için karışım miktarları

| Malzemeler | Hacim(dm ³) | γ_c (gr/cm ³) | Kütle(kg) |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------|
| (0-4 mm) Agrega %50 | 7.11 | 2.66 | 18.920 |
| (4-11.2 mm) Agrega %25 | 3.50 | 2.70 | 9.460 |
| (11.2-22.4 mm) Agrega %25 | 3.49 | 2.71 | 9.460 |
| DMFC-800 | 1.94 | 3 | 5.830 |
| Su | 3.74 | 1 | 3.740 |
| Katkı | 0.04 | 1.053 | 0.047 |

Beton numuneler hazırlanırken;

- 1) Çizelge 3.12'de verilen malzemeler hassas terazide tartılarak mikser içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.6 a,b,c).
- 2) Mikser çalıştırılarak agrega ve ince taneli çimentonun birbirine karışması sağlanmıştır (Şekil 3.6 d).

- 3) Akışkanlaştırıcı katkı belirlenen suya ilave edilerek karıştırılmış, daha sonra karışım içerisinde yavaş yavaş dökülmüş ve karıştırmaya devam edilmiştir.
- 4) Beton hazır olduktan sonra karışım daha önceden kalıp yağı ile yağlanan (15cmx15cmx15cm) küp kalıplar içerisinde 3 tabaka halinde, her tabaka arası şişlenerek ve tokmaklanarak yerleştirilmiştir.
- 5) Son olarak kalıpta yerleştirilen betonun yüzeyi mala ile düzgün hale getirilmiş ve beton numunelerin ismi ve kodu etiket halinde yapıştırılmıştır (Şekil 3.7).
- 6) Hazırlanan numuneler 24 saat içerisinde prizini aldıktan sonra kalıptan çıkarılmış ve istenen kür ortamlarında gruplar halinde yerleştirilmiştir (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).



Şekil 3.6. Beton karışımının hazırlanması: (a) agrega tartımı (b) su tartımı (c) kullanılan beton mikseri (d) malzemelerin karıştırılması



Şekil 3.7. Betonun kalıplara yerleştirilmesi ve etiket yapıştırılması



Şekil 3.8. Betonun kalıptan çıkarılması



Şekil 3.9. kalıptan çıkarılan betonlar

Çizelge 3.12’de 1m³ beton için karışım detayları verilmektedir.

Çizelge 3.12. 1m³’te C25/30 beton sınıfı için karışım miktarları

| Beton serileri | Agrega (kg/m ³) | | | DMFC-800 (kg/m ³) | Silis dumanı | | Su (l/m ³) | Mikro fiber (kg/m ³) | Katkı % | Hava % |
|----------------------|-----------------------------|--------|-----------|-------------------------------|----------------------|----|------------------------|----------------------------------|---------|--------|
| | 0-4 | 4-11.2 | 11.2-22.4 | | (kg/m ³) | % | | | | |
| SD ₀ B | 858 | 429 | 429 | 265 | 0 | 0 | 170 | 0 | 0.8 | 1 |
| SD ₅ B | 860 | 430 | 430 | 252 | 13 | 5 | 170 | 0 | 0.8 | 1 |
| SD ₁₀ B | 863 | 431 | 431 | 238 | 26 | 10 | 170 | 0 | 0.8 | 1 |
| SD ₁₅ B | 865 | 432 | 432 | 225 | 40 | 15 | 170 | 0 | 0.8 | 1 |
| SD ₀ kmB | 858 | 429 | 429 | 265 | 0 | 0 | 170 | 0.6 | 1 | 1 |
| SD ₅ kmB | 860 | 430 | 430 | 252 | 13 | 5 | 170 | 0.6 | 1 | 1 |
| SD ₁₀ kmB | 863 | 431 | 431 | 238 | 26 | 10 | 170 | 0.6 | 1 | 1 |
| SD ₁₅ kmB | 865 | 432 | 432 | 225 | 40 | 15 | 170 | 0.6 | 1 | 1 |

3.2.2. Karbonatlaşma deneyi

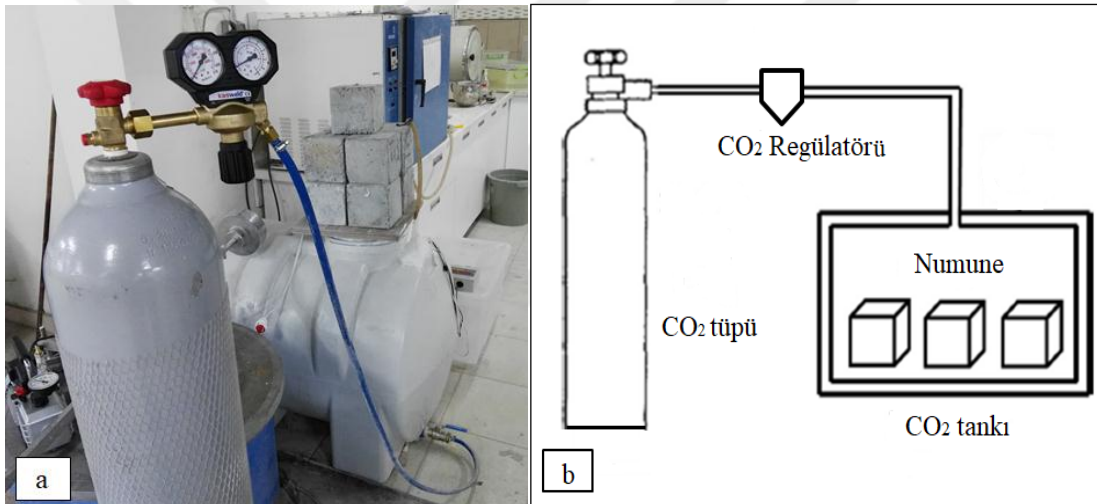
Karbonatlaşma deneyi serbest hava şartlarında, laboratuvar ortamında ve yoğunlaştırılmış karbondioksit ortamında yapılmaktadır. Genel anlamda karbonatlaşma deneyi, normal ortamda uzun yıllar aldığından, laboratuvar ortamında hızlandırılmış deneyler ile yapılarak daha kısa sürede sonuca ulaşılabilir. Karbonatlaşma ile ilgili olarak daha önceki çalışmalarda, daha çok yapılan hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi yer almaktadır. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyinde yoğunlaştırılmış karbondioksit ortamı %1 ve %100 arasında değişebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında da hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği uygulanmıştır. Bu amaçla 500 litrelik kalın ve basınca dayanıklı yatay bir silindir depo kullanılmıştır. Çizelge 3.13’te üretilen beton numuneler, her bir seriden 3’er adet 28 ve 56 gün süre ile deponun içerisinde konulmuştur. Daha sonra deponun kapağı gaz sızdırmaz hale getirilerek içindeki hava vakum ile boşaltılmış ve yerine CO₂ gazı eklenmiştir (Şekil 3.10). Depo içindeki nem miktarı %60±5, sıcaklığı 20±2 °C ve CO₂ miktarı %2 civarında sabit tutulmuştur (Şekil 3.11). Deponun içindeki nem miktarı, sıcaklık miktarı ve havanın türbülansı yukarıda sözü edilen kriterlere uymak için termostat, rezistanslı nem kazanı ve fan gibi aparatlar yerleştirilmiştir. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için üretilen bütün beton serilerine aynı şartlar uygulanmıştır. Buradaki amaç deneyde ince taneli çimento (DMFC-800) yerine farklı oranlarda silis

dumanı katkı maddeleri kullanılarak oluşturulan küp numuneleri arasında kıyaslama yapılabilir.

Çizelge 3.13. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için üretilen numuneler

| Numune Serileri | Silis Dumanı Oranı | Numuneler | |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|
| | | 28 Günlük | 56 Günlük |
| SD ₀ B | %0 | 3 | 3 |
| SD ₅ B | %5 | 3 | 3 |
| SD ₁₀ B | %10 | 3 | 3 |
| SD ₁₅ B | %15 | 3 | 3 |
| SD ₀ kmB | %0 | 3 | 3 |
| SD ₅ kmB | %5 | 3 | 3 |
| SD ₁₀ kmB | %10 | 3 | 3 |
| SD ₁₅ kmB | %15 | 3 | 3 |
| Toplam | | 24 | 24 |



Şekil 3.10. Hızlandırılmış karbonatlaşma deney sistemi: (a) hızlandırılmış karbonatlaşma deneyin gerçek görünümü (b) hızlandırılmış karbonatlaşma deneyin şematik gösterimi



Şekil 3.11. Nem kazanına ve fana bağlayan termostat

Numuneler test edilmek üzere karbonatlaşma yaşı 28 gün ve 56 gün sonunda deponun içerisinden çıkarılmış ve sulu baş kesme makinesi ile iki yarım parçaya bölünmüştür. Kesilen parçalar üzerinde phenolphtalein maddesi püskürtülmüştür. Püskürtülen phenolphtalein maddesi karbonatlaşmış bölgelerde renk değişimi yapmamış, karbonatlaşmamış bölgelerde ise renk değişimi yapmıştır.

3.2.3. Sülfat etkisi deneyi

Betonun sülfat etkisi deneyi için önceden üretilmiş numuneler iki tip sülfat (Na_2SO_4 ve MgSO_4) çözeltileri içerisinde kür edilmiştir. Üretilen numuneler, %2 sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve %2 magnezyum sülfat (MgSO_4) suyu içerisinde 24'er adet 4 kür deposu olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sülfat etkisi deneyi için üretilen beton numuneler Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisi deneyi için üretilen numuneler

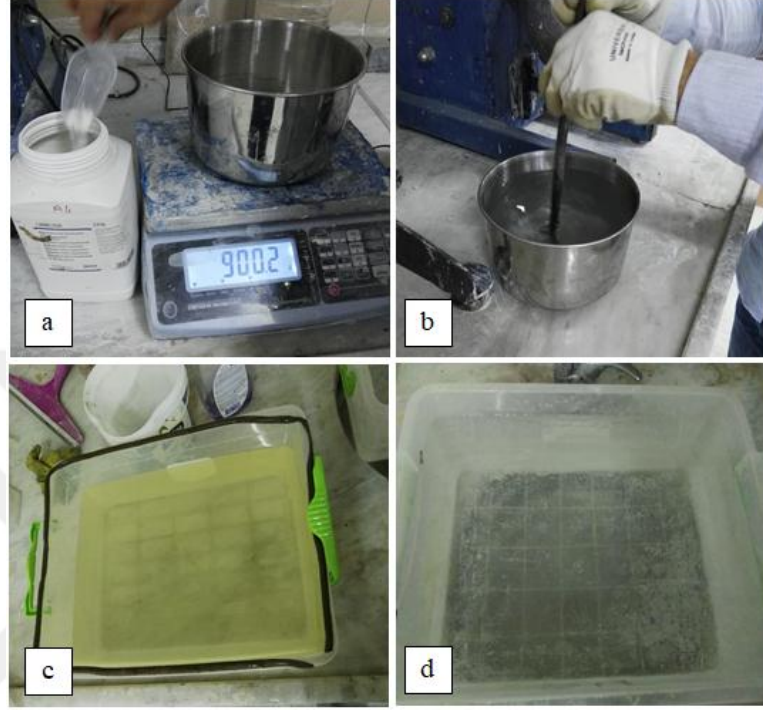
| Numuneler | Sodyum sülfat (Na_2SO_4) | | Magnezyum sülfat (MgSO_4) | |
|----------------------|--|-----------|--------------------------------------|-----------|
| | 28 günlük | 90 günlük | 28 günlük | 90 günlük |
| SD ₀ B | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₅ B | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₁₀ B | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₁₅ B | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₀ kmB | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₅ kmB | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₁₀ kmB | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SD ₁₅ kmB | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Toplam | 24 | 24 | 24 | 24 |

Magnezyum sülfat çözeltisi; Deneyde çözelti hazırlamak için Merck markalı magnezyum-sülfat-heptahidrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. Çözeltide esas alınan yüzdeler magnezyum sülfat (MgSO_4) için geçerli alınmıştır.

Sodyum sülfat çözeltisi; Deneyde çözelti hazırlamak için Merck markalı sodyum-sülfat-anhidrat (Na_2SO_4) kullanılmıştır. Çözeltide esas alınan yüzdeler sodyum sülfat (Na_2SO_4) için geçerli alınmıştır.

Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerin hazırlanması için Konya Teknik Üniversitesinin Yapı Malzeme Laboratuvarı'na şehir şebekesinden gelen çeşme suyu kullanılmıştır. Her bir kür deposunda 1 litre su için 20 gr sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve 20 gr magnezyum sülfat (MgSO_4) tuzu ayrı ayrı olacak şekilde ağırlıkça %2 çözelti hazırlanmıştır. Şekil 3.12'de sülfat tuzlarının tartımı ve çözünmesi ve Şekil 3.13'te

beton kr deposu gösterilmiştir. Beton numuneler 28 ve 90 gün sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve magnezyum sülfat (MgSO_4) zlteleri içerisinde, dış sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Kr süresi bitiminde beton numuneler üzerine basıncı dayanımı deneyi yapılmıştır.



şekil 3.12. Sülfat zltelerin hazırlanması: (a) sülfat tuzunun tartımı (b) zltinin karıştırılması ve sülfat tuzunun znmesi (c) magnezyum sülfat zltisi (d) sodyum sülfat zltisi



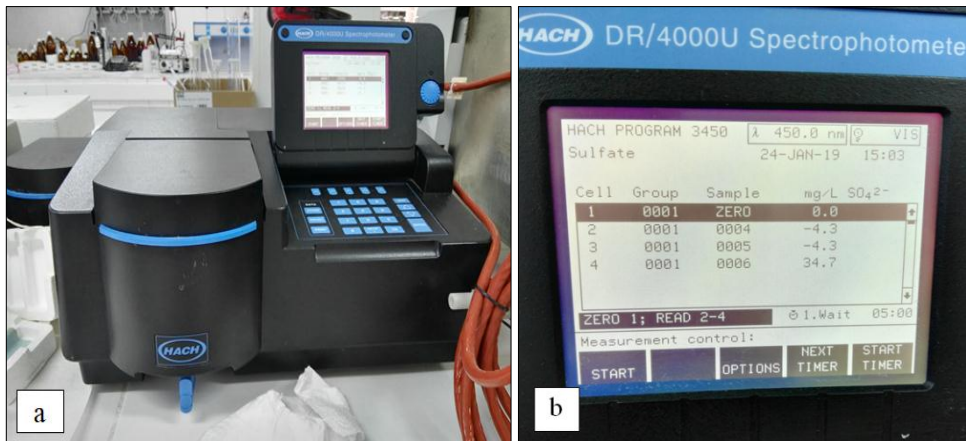
şekil 3.13. Sodyum sülfat kr deposu

3.2.4. Sülfat tayini

Beton numuneler 28 ve 90 gün %2 sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve %2 magnezyum sülfat (MgSO_4) konsantrasyonlarındaki dış sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Betonların bekletmiş olduğu sülfat çözeltilerden sülfat analizi yapmak üzere her 10 günde bir arayla 50 ml'lik düzenli olarak örnek numune alınmıştır (Şekil 3.14). Sülfat tayini deneyi türbidimetrik yöntemi kullanılarak 8051 standart metoduna göre yapılmıştır (Association ve ark., 1915). Bu yöntem ışığın sulu çözelti içinde partikül madde ile dağılması gerçeğine dayanır. Baryum ve sülfat su içinde reaksiyona girdiğinde, çözeltiyi bulanıklaştırır. Deneyde sülfat çözeltisine Ba^{2+} iyonu eklenerek manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Baryum (Ba^{2+}) iyonu sülfat çözeltisine bulanıklık oluşturur. Çözeltide sülfat iyonu ne kadar fazla olursa bulanıklık o derecede artar. Tüm numunelere BaCl_2 kristali eklendikten 5 dakika sonra HACH DR/4000U Spektrofotometrede sülfat iyonu okunmuştur (Şekil 3.15).



Şekil 3.14. Sülfat çözeltilerden alınan numuneler



Şekil 3.15. Sülfat analizi: (a) spektrofotometre cihazı (b) cihazın ekran görüntüsü

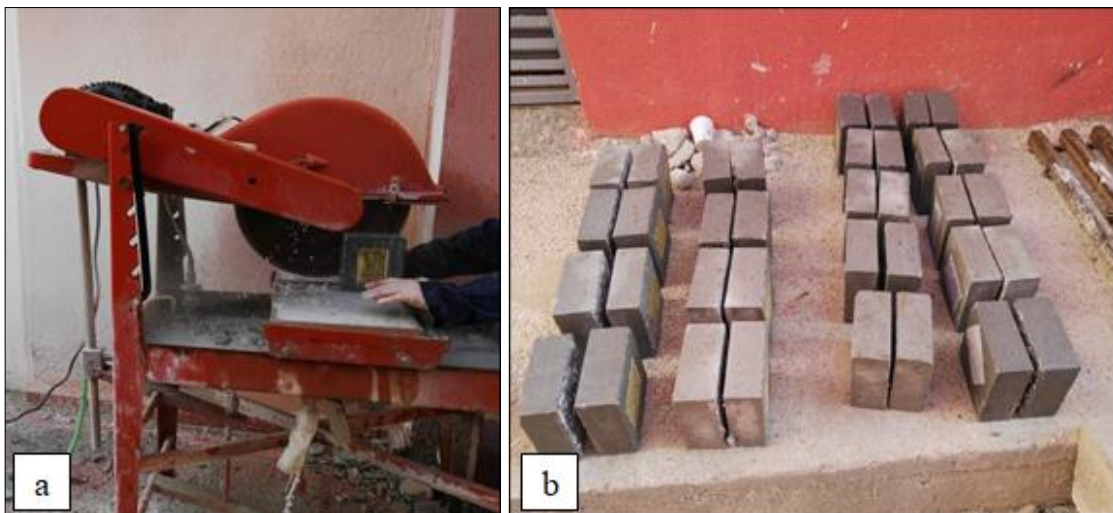
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Deneysel Sonuçları

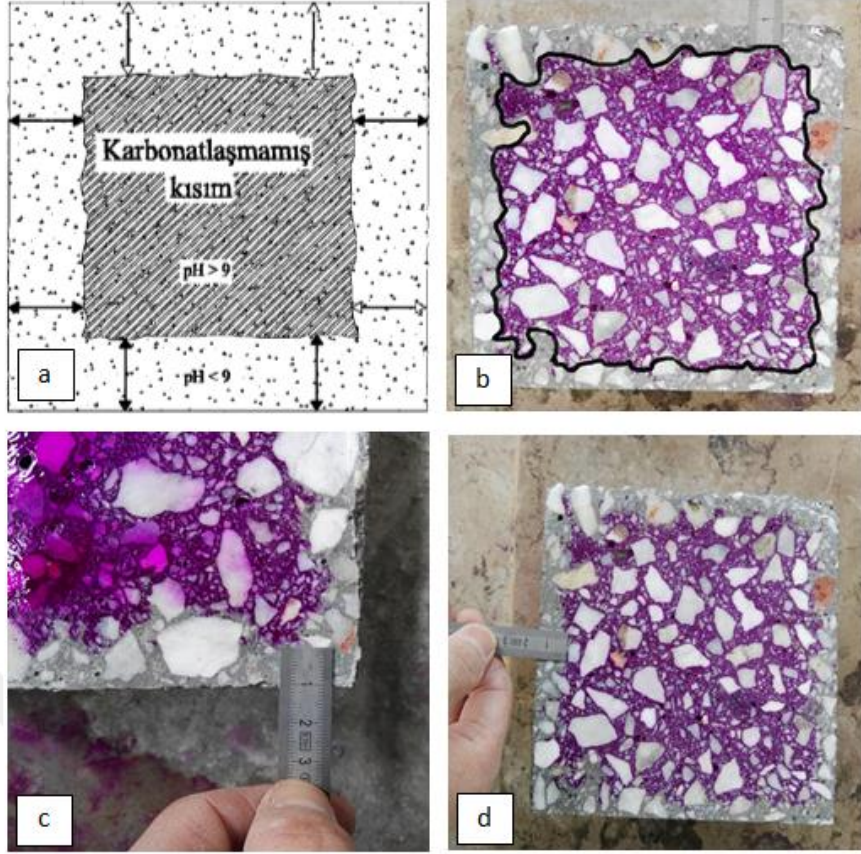
4.1.1. Karbonatlaşmanın deneysel sonuçları

Deneyde EN BS 13295:2004 standardı esas alınarak karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Karbonatlaşma deneyi için üretilen beton numuneler, 28 ve 56 gün sonunda her grup beton için 3'er adet CO₂ tankının içerisinde çıkarılarak sulu baş kesme makinesi ile iki eşit parçaya bölünmüştür (Şekil 4.1). Kesilen beton yüzeyine püskürtülen phenolphtalein indikatörü, karbonatlaşma olmayan bölgelerde renk değişimi yapmıştır. Karbonatlaşma olan bölgelerde ise rengi değişmemiştir. Karbonatlaşma derinliği betonun yüzey kısmından itibaren içe doğru farklı noktalardan, köşe ve ortaldan cetvelle ölçülüp ortalaması alınmıştır (Şekil 4.2).

Literatür çalışmasında da belirtildiği üzere karbonatlaşmayı belirlemek için farklı yöntemler kullanılır. Bu çalışmada en çok yaygın olan phenolphtalein indikatörü kullanılmıştır. Phenolphtalein betonun bünyesinde bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer ve renk değişimine sebep olur. Bu renksiz alanların pH değeri 9.0'ın altındadır (Gönen, 2003; Özer, 2012; Kara, 2013; Baharavar, 2016). Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görüldüğü gibi pembe rengi alan kısımlar betonun alkaline olduğu alanlardır. Renklenmenin olmadığı bölümler ise, karbonatlaşma olan bölümlerdir.



Şekil 4.1. Beton numunelerin kesilmesi: (a) beton kesme makinesi (b) iki eşit parçaya bölünen beton numuneleri



Şekil 4.2. Phenolphtalein püskürtülmesi ve karbonatlaşma miktarının ölçülmesi: (a) karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış bölgenin şematik gösterimi (b) beton numunesi üzerinde gösterilen karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış bölgenin ayırımı (c) köşeden karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi (d) ortadan karbonatlaşma derinliğinin ölçülmesi



Şekil 4.3. Karbonatlaşmış beton numuneleri

Sekiz farklı karışıma ait betonların karbonatlaşma miktarlarına ilişkin sayısal verilerin 28 günlük Çizelge 4.1’de ve 56 günlük Çizelge 4.2’de verilmiştir. Silis dumanı ve mikro fiber karbonatlaşmayı azaltma yönünde pozitif etki göstermiştir. Karbonatlaşma direnci en çok mikro fiber ve %10, %15 silis dumanı içeren betonlarda görülürken, en az karbonatlaşma direnci ise silis dumanı ve mikro fiber içermeyen betonlarda görülmüştür.

Çizelge 4.1. 28 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği deney sonuçları

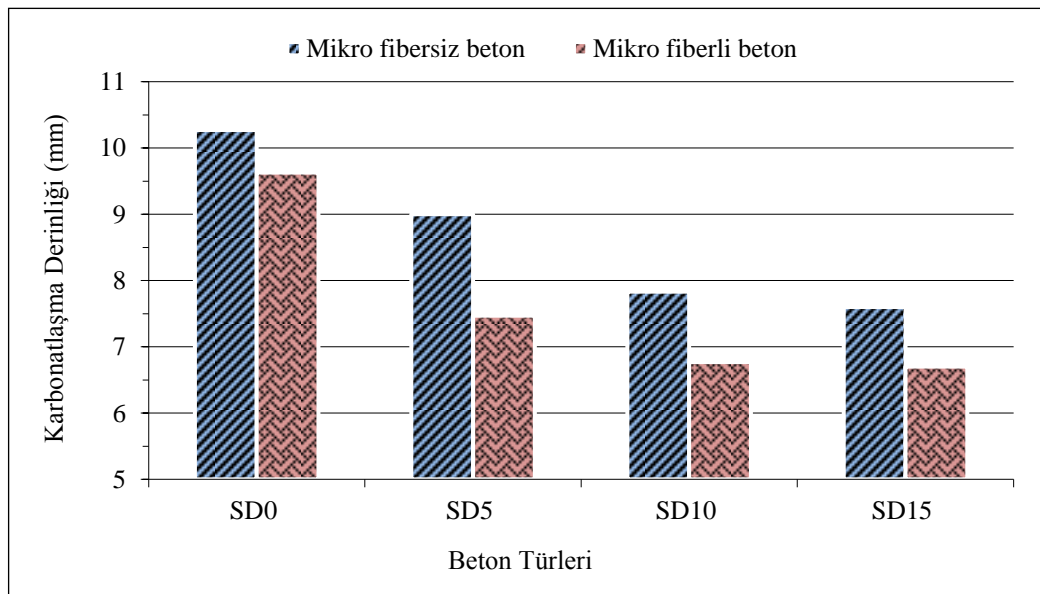
| Kodlar | Numuneler | 28 günlük karbonatlaşma derinliği (mm) | 28 günlük ortalama karbonatlaşma derinliği (mm) |
|----------------------|------------------|---|--|
| SD ₀ B | 1.n | 11.10 | 10.27 |
| | 2.n | 9.50 | |
| | 3.n | 10.20 | |
| SD ₅ B | 1.n | 9.50 | 9.00 |
| | 2.n | 9.40 | |
| | 3.n | 8.10 | |
| SD ₁₀ B | 1.n | 8.60 | 7.83 |
| | 2.n | 7.80 | |
| | 3.n | 7.10 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 6.50 | 7.60 |
| | 2.n | 8.70 | |
| | 3.n | 7.60 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 9.10 | 9.63 |
| | 2.n | 11.20 | |
| | 3.n | 8.60 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 7.30 | 7.47 |
| | 2.n | 6.20 | |
| | 3.n | 8.90 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 7.80 | 6.77 |
| | 2.n | 5.80 | |
| | 3.n | 6.70 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 7.00 | 6.70 |
| | 2.n | 6.20 | |
| | 3.n | 6.90 | |

Çizelge 4.2. 56 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği deney sonuçları

| Kodlar | Numuneler | 56 günlük karbonatlaşma derinliği (mm) | 56 günlük ortalama karbonatlaşma derinliği (mm) |
|-------------------|------------------|---|--|
| SD ₀ B | 1.n | 13.20 | 12.40 |
| | 2.n | 11.40 | |
| | 3.n | 12.60 | |
| SD ₅ B | 1.n | 11.10 | 11.40 |
| | 2.n | 12.30 | |
| | 3.n | 10.80 | |

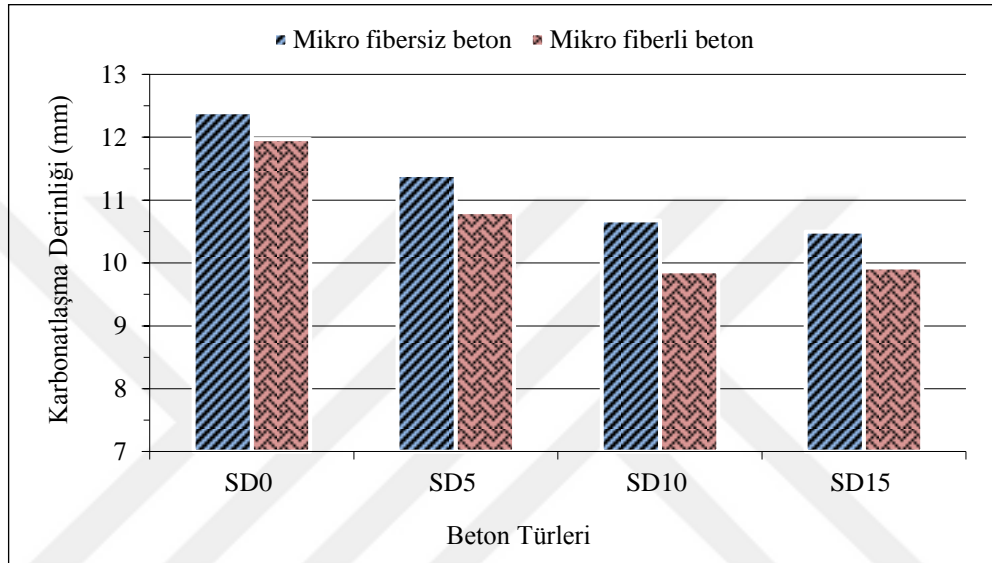
| Çizelge 4.2'nin devamı | | | |
|------------------------|-----|-------|-------|
| SD ₁₀ B | 1.n | 11.70 | 10.68 |
| | 2.n | 9.20 | |
| | 3.n | 11.15 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 11.20 | 10.50 |
| | 2.n | 9.90 | |
| | 3.n | 10.40 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 10.70 | 11.97 |
| | 2.n | 12.80 | |
| | 3.n | 12.40 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 11.12 | 10.81 |
| | 2.n | 10.80 | |
| | 3.n | 10.50 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 9.50 | 9.87 |
| | 2.n | 10.30 | |
| | 3.n | 9.80 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 10.60 | 9.93 |
| | 2.n | 10.40 | |
| | 3.n | 8.80 | |

28 günlük ortalama karbonatlaşma derinliğine ait grafik Şekil 4.4'te verilmiştir. Burada silis dumanının oranına bağlı karbonatlaşma miktarı değişimi görülmektedir. Silis dumanı oranı arttıkça karbonatlaşma miktarı düşmüştür. Bununla birlikte betona mikro fiber katkısı eklendiğinde karbonatlaşma miktarının daha çok düştüğü gözlenmektedir. En çok karbonatlaşma miktarı silis dumanı ve mikro fiber içermeyen betonda görülürken, en az karbonatlaşma miktarı mikro fiber ve %15 silis dumanı içeren betonda görülmektedir.



Şekil 4.4. 28 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği

56 günlük ortalama karbonatlaşma derinliğine ait grafik Şekil 4.5'te verilmiştir. Bilindiği üzere karbonatlaşma miktarı zamanla artış göstermektedir. 56 günlük karbonatlaşma miktarı 28 günlüğe kıyasla tüm beton serilerindeki artış açıkça gözlenmektedir. 56 günlük karbonatlaşma miktarı 28 günlüğe oranla ortalama olarak 2-3 mm daha derine inmiştir. Burada en az karbonatlaşma miktarı mikro fiber ve %10 silis dumanı içeren betonda görülürken, en çok karbonatlaşma miktarı mikro fiber ve silis dumanı içermeyen betonda görülmektedir.



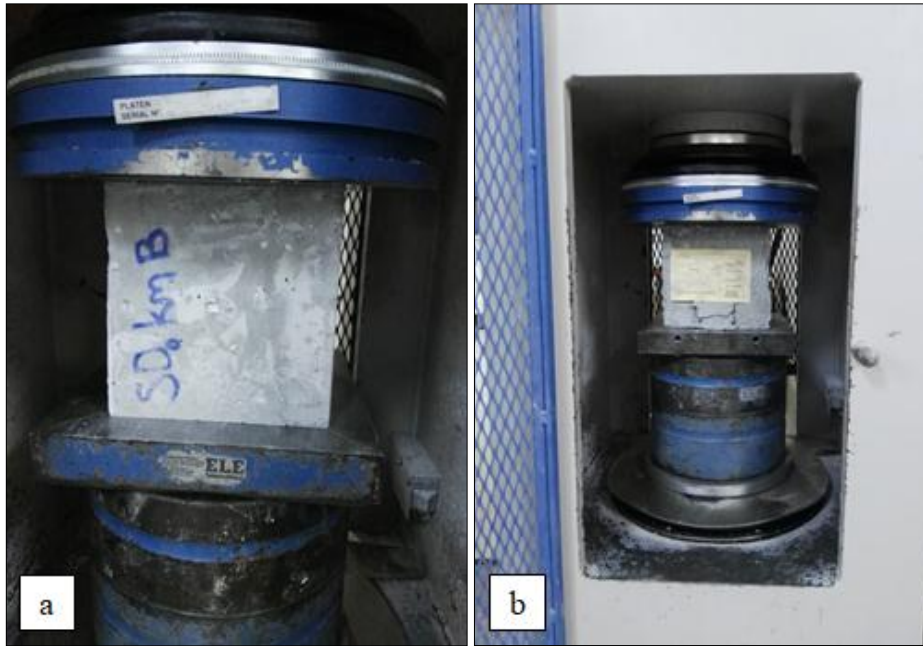
Şekil 4.5. 56 günlük numunelerin karbonatlaşma derinliği

4.1.2. Sülfat etkisi deney sonuçları

Üretilen beton numuneler 28 ve 90 gün sonunda sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve referans betonu olarak üç farklı kür ortamından çıkarılarak fiziksel görünümü incelenmiştir. Sodyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin dış görünümünde herhangi bir bozulma ve çatlama gibi hasarlar gözlenmemiş, magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin yüzeyinde ise belirgin lekeler ve köpükler olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.6'da magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin yüzeyinde meydana gelen lekeler ve bozulmalar görülmektedir. Havuzdan çıkarılan numuneler kuruduktan sonra basınç dayanımını belirlemek için deney cihazına tabi tutulmuştur. Şekil 4.7'de kullanılan deney cihazı ve beton kırıldıktan sonraki hali görülmektedir.

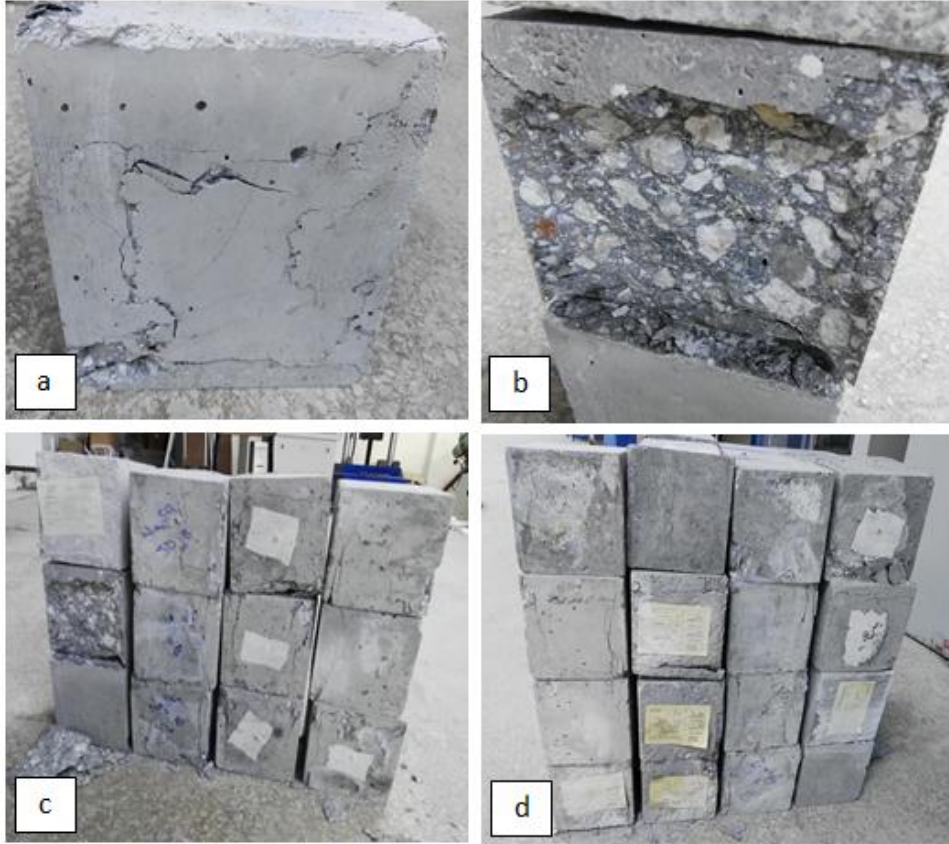


Şekil 4.6. Sülfat etkisi ile bozulma oluşan betonlar: (a) sülfat çözeltisinden çıkarılan beton numuneleri (b, c ve d) sülfat etkisi ile beton yüzeyinde oluşan beyaz lekeler ve köşelerinde meydana gelen hafif dökülmeler



Şekil 4.7. Betonun basınç dayanımı deneyi: (a) betonun deney cihazına yerleştirilmesi (b) betona basınç uygulandıktan sonraki hali

Şekil 4.8’de deney bittikten sonra beton numunelerinde meydana gelen deformasyon görülmektedir.



Şekil 4.8. Kırılmış beton numuneleri: (a) beton basınç uygulandıktan sonra çaprazdan çatlama (b) beton kırıldıktan sonra yüzeyden dökülme (c ve d) betonların diğer boyutlardan alınan deformasyon şekilleri

Beton kırımı için TS EN 12390-3 standardı esas alınmıştır. Beton numuneler, beton basınç ölçüm cihazının 6.8 KN/s yükleme hızı ile kırılmıştır. Basınç dayanımı Eşitlik 4.1’deki gibi hesaplanmıştır:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Burada:

f_c = Beton basınç dayanımı (N/mm²)

P = Kırılma yükü (KN)

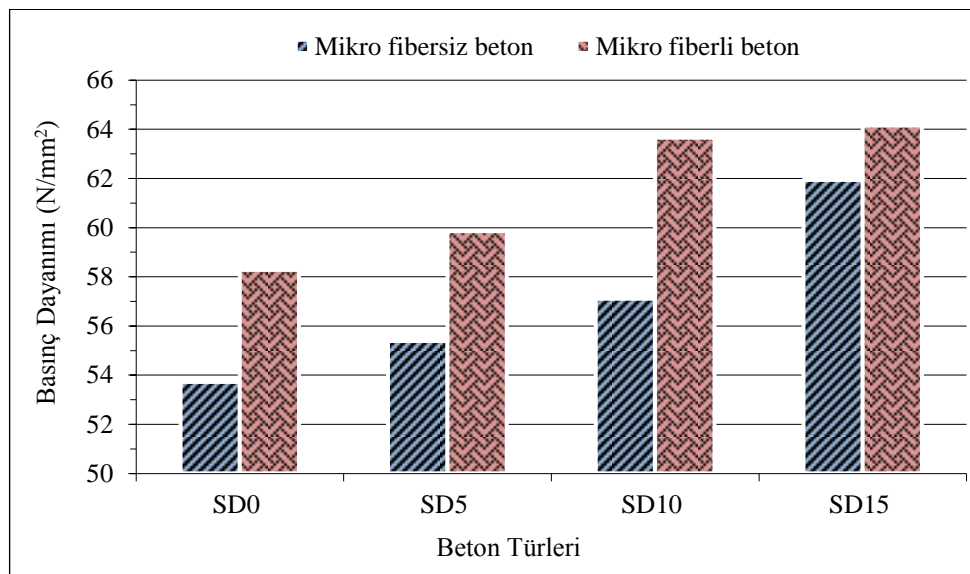
A = Beton yüzey alanı (mm²)

Bölüm 3’te kodlar halinde verilen beton numunelerin farklı karışımları, her bir seriden 3’er adet numune kırılarak ortalaması alınmıştır. 28 gün normal suda kür edilen şahit numunelerin deney sonuçları Çizelge 4.3’te ve basınç dayanımı grafik ilişkileri

Şekil 4.9’da verilmiştir. Sonuçlara göre; betonda silis dumanının katılması, beton basınç dayanımının artırılmasına önemli ölçüde etkisi olmuştur. Silis dumanı oranının artması ile betondaki mukavemet değeri artmıştır. Aynı karışımlarda mikro fiber eklendiğinde, beton basınç dayanımı daha çok artış göstermiştir. Burada en yüksek basınç dayanımı mikro fiber ve %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren betonlarda, en az basınç dayanımı silis dumanı ve mikro fiber içermeyen betonlarda görülmektedir.

Çizelge 4.3. Beton referans numunelerin basınç dayanımı sonuçları

| Numuneler | Kontrol numune sayısı | Beton yüzey alanı, A (mm ²) | Yük, P (KN) | Beton basınç dayanımı, f_c (N/mm ²) | Beton basınç dayanımı, Ort. f_c (N/mm ²) |
|----------------------|-----------------------|---|-------------|---|--|
| SD ₀ B | 1.n | 22500 | 1221 | 54.27 | 53.72 |
| | 2.n | 22500 | 1199 | 53.29 | |
| | 3.n | 22500 | 1206 | 53.60 | |
| SD ₅ B | 1.n | 22500 | 1215 | 54.00 | 55.39 |
| | 2.n | 22500 | 1256 | 55.82 | |
| | 3.n | 22500 | 1268 | 56.36 | |
| SD ₁₀ B | 1.n | 22500 | 1301 | 57.82 | 57.11 |
| | 2.n | 22500 | 1270 | 56.44 | |
| | 3.n | 22500 | 1284 | 57.07 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 22500 | 1401 | 62.27 | 61.93 |
| | 2.n | 22500 | 1412 | 62.76 | |
| | 3.n | 22500 | 1367 | 60.76 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 22500 | 1298 | 57.69 | 58.27 |
| | 2.n | 22500 | 1289 | 57.29 | |
| | 3.n | 22500 | 1346 | 59.82 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 22500 | 1392 | 61.87 | 59.85 |
| | 2.n | 22500 | 1331 | 59.16 | |
| | 3.n | 22500 | 1317 | 58.53 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 22500 | 1404 | 62.40 | 63.66 |
| | 2.n | 22500 | 1437 | 63.87 | |
| | 3.n | 22500 | 1456 | 64.71 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 22500 | 1432 | 63.64 | 64.15 |
| | 2.n | 22500 | 1407 | 62.53 | |
| | 3.n | 22500 | 1491 | 66.27 | |

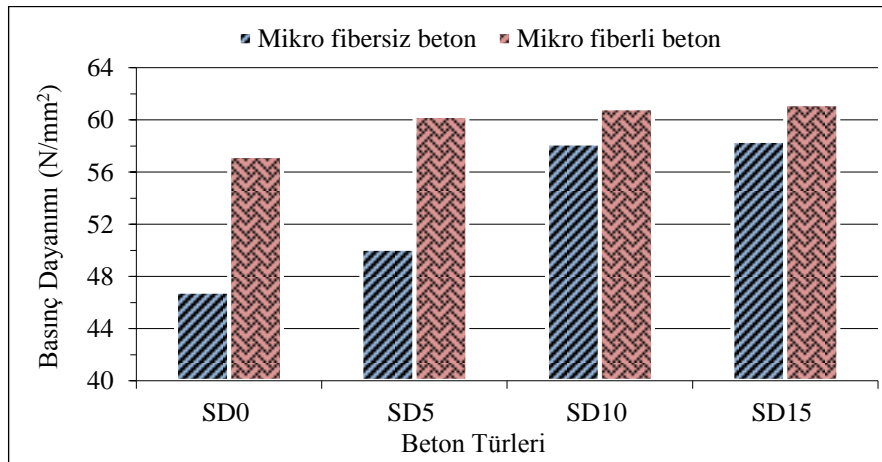


Şekil 4.9. 28 gün normal suda bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10 bakıldığında, silis dumanı oranı arttıkça beton basınç dayanımı artmıştır. 28 gün sodyum sülfatlı suda bekleyen betonlar, normal suda bekleyen betonlar ile basınç mukavemeti benzer davranış göstermiştir. Mikro fiberli betonların basınç dayanımı mikro fibersiz betonlara göre daha yüksek olmuştur. Mikro fiberli betonların basınç dayanımı özellikle SD₅, SD₁₀ ve SD₁₅ betonlar, birbirine çok yakın değerleri izlemiştir. Burada en az basınç dayanımı mikro fiber ve silis dumanı içermeyen betonlarda görülmektedir.

Çizelge 4.4. 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları

| Numuneler | Na ₂ SO ₄ numune sayısı | Beton yüzey alanı, A (mm ²) | Yük, P (KN) | Beton basınç dayanımı, f _c (N/mm ²) | Beton basınç dayanımı, Ort. f _c (N/mm ²) |
|----------------------|---|---|-------------|--|---|
| SD ₀ B | 1.n | 22500 | 1120 | 49.78 | 46.84 |
| | 2.n | 22500 | 1040 | 46.22 | |
| | 3.n | 22500 | 1002 | 44.53 | |
| SD ₅ B | 1.n | 22500 | 1182 | 52.53 | 50.12 |
| | 2.n | 22500 | 1060 | 47.11 | |
| | 3.n | 22500 | 1141 | 50.71 | |
| SD ₁₀ B | 1.n | 22500 | 1273 | 56.58 | 58.19 |
| | 2.n | 22500 | 1235 | 54.89 | |
| | 3.n | 22500 | 1420 | 63.11 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 22500 | 1336 | 59.38 | 58.40 |
| | 2.n | 22500 | 1406 | 62.49 | |
| | 3.n | 22500 | 1200 | 53.33 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 22500 | 1310 | 58.22 | 57.24 |
| | 2.n | 22500 | 1176 | 52.27 | |
| | 3.n | 22500 | 1378 | 61.24 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 22500 | 1454 | 64.62 | 60.31 |
| | 2.n | 22500 | 1321 | 58.71 | |
| | 3.n | 22500 | 1296 | 57.60 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 22500 | 1301 | 57.82 | 60.89 |
| | 2.n | 22500 | 1445 | 64.22 | |
| | 3.n | 22500 | 1364 | 60.62 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 22500 | 1352 | 60.09 | 61.21 |
| | 2.n | 22500 | 1388 | 61.69 | |
| | 3.n | 22500 | 1392 | 61.87 | |

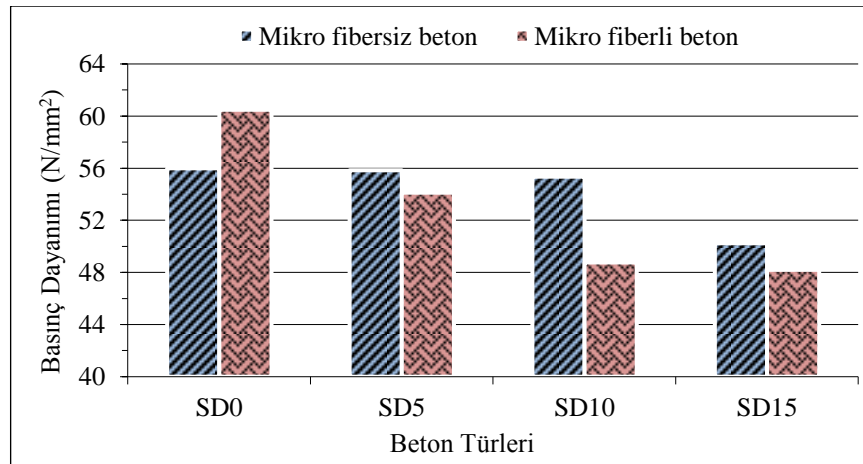


Şekil 4.10. 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi

28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin deney sonuçları Çizelge 4.5'te ve basınç dayanımı grafik ilişkileri Şekil 4.11'de verilmiştir. Burada, silis dumanının oranı arttıkça beton basınç mukavemetinin düştüğü açıkça gözlenmektedir. Ayrıca, mikro fibrsiz betonların basınç mukavemeti, mikro fiberli betonlara kıyasla daha yüksek olmuştur. En yüksek basınç dayanımı silis dumanı içermeyen ve mikro fiber içeren betonda (SD₀) görülürken, en az basınç dayanımı mikro fiber ve %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren betonlarda görülmektedir. Mikro fiber içermeyen SD₀, SD₅ ve SD₁₀ betonların dayanım kaybı değerleri birbirine çok yakın olmuştur.

Çizelge 4.5. 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları

| Numuneler | MgSO ₄ numune sayısı | Beton yüzey alanı, A (mm ²) | Yük, P (KN) | Beton basınç dayanımı, f _c (N/mm ²) | Beton basınç dayanımı, Ort. f _c (N/mm ²) |
|----------------------|---------------------------------|---|-------------|--|---|
| SD ₀ B | 1.n | 22500 | 1268 | 56.36 | 55.99 |
| | 2.n | 22500 | 1259 | 55.96 | |
| | 3.n | 22500 | 1252 | 55.64 | |
| SD ₅ B | 1.n | 22500 | 1237 | 54.98 | 55.85 |
| | 2.n | 22500 | 1243 | 55.24 | |
| | 3.n | 22500 | 1290 | 57.33 | |
| SD ₁₀ B | 1.n | 22500 | 1211 | 53.82 | 55.36 |
| | 2.n | 22500 | 1290 | 57.33 | |
| | 3.n | 22500 | 1236 | 54.93 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 22500 | 1148 | 51.02 | 50.25 |
| | 2.n | 22500 | 1115 | 49.56 | |
| | 3.n | 22500 | 1129 | 50.18 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 22500 | 1428 | 63.47 | 60.49 |
| | 2.n | 22500 | 1240 | 55.11 | |
| | 3.n | 22500 | 1415 | 62.89 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 22500 | 1273 | 56.58 | 54.13 |
| | 2.n | 22500 | 1111 | 49.38 | |
| | 3.n | 22500 | 1270 | 56.44 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 22500 | 1095 | 48.67 | 48.76 |
| | 2.n | 22500 | 1166 | 51.82 | |
| | 3.n | 22500 | 1030 | 45.78 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 22500 | 1132 | 50.31 | 48.19 |
| | 2.n | 22500 | 996.5 | 44.29 | |
| | 3.n | 22500 | 1124 | 49.96 | |

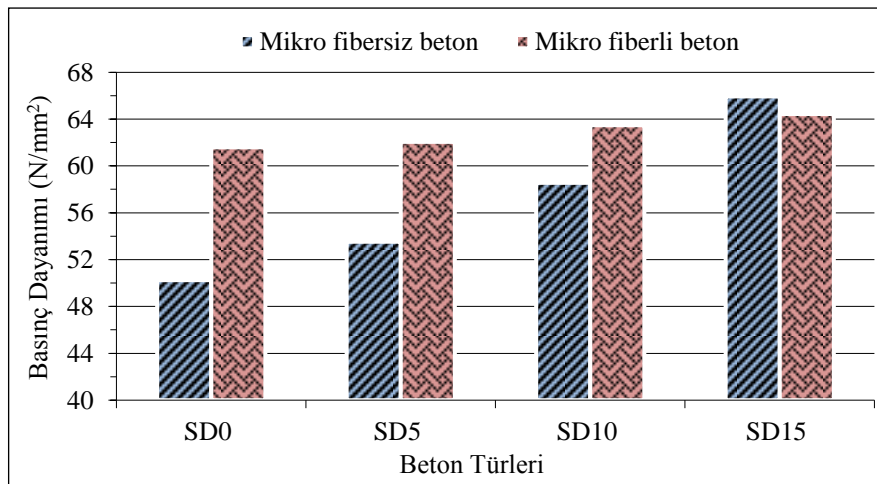


Şekil 4.11. 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibrsiz betonların basınç dayanımı ilişkisi

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.12 incelendiğinde, 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler, kontrol numunelere ve 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelere benzer şekilde silis dumanının oranına bağlı beton basınç dayanımı artmıştır. Tüm beton numuneler göz önüne alındığında mikro fibersiz betonlar, mikro fiberli betonlara kıyasla basınç dayanımı düşmüştür. Fakat silis dumanının oranı %15 iken mikro fibersiz beton, mikro fiberli betona göre mukavemeti bir miktar artma göstermiştir. Mikro fiberli betonların basınç dayanımındaki artış düzeyi mikro fibersiz betonlara göre daha az görülmektedir.

Çizelge 4.6. 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları

| Numuneler | Na ₂ SO ₄ numune sayısı | Beton yüzey alanı, A (mm ²) | Yük, P (KN) | Beton basınç dayanımı, f _c (N/mm ²) | Beton basınç dayanımı, Ort. f _c (N/mm ²) |
|----------------------|---|---|-------------|--|---|
| SD ₀ B | 1.n | 22500 | 1085 | 48.22 | 50.24 |
| | 2.n | 22500 | 1203 | 53.47 | |
| | 3.n | 22500 | 1103 | 49.02 | |
| SD ₅ B | 1.n | 22500 | 1271 | 56.49 | 53.53 |
| | 2.n | 22500 | 1149 | 51.07 | |
| | 3.n | 22500 | 1193 | 53.02 | |
| SD ₁₀ B | 1.n | 22500 | 1339 | 59.51 | 58.56 |
| | 2.n | 22500 | 1245 | 55.33 | |
| | 3.n | 22500 | 1369 | 60.84 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 22500 | 1369 | 60.84 | 65.93 |
| | 2.n | 22500 | 1570 | 69.78 | |
| | 3.n | 22500 | 1511 | 67.16 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 22500 | 1444 | 64.18 | 61.60 |
| | 2.n | 22500 | 1374 | 61.07 | |
| | 3.n | 22500 | 1340 | 59.56 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 22500 | 1415 | 62.89 | 62.06 |
| | 2.n | 22500 | 1423 | 63.24 | |
| | 3.n | 22500 | 1351 | 60.04 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 22500 | 1512 | 67.20 | 63.47 |
| | 2.n | 22500 | 1410 | 62.67 | |
| | 3.n | 22500 | 1362 | 60.53 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 22500 | 1379 | 61.29 | 64.43 |
| | 2.n | 22500 | 1463 | 65.02 | |
| | 3.n | 22500 | 1507 | 66.98 | |

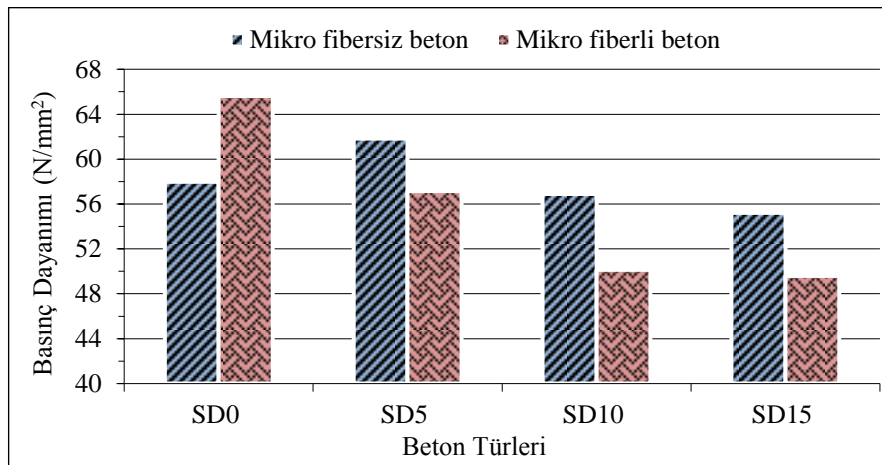


Şekil 4.12. 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.13'te görüldüğü üzere 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde, silis dumanının oranı arttıkça beton basınç mukavemeti düşmüştür. Burada en yüksek basınç dayanımı silis dumanı içermeyen ve mikro fiber içeren betonda görülürken, en az basınç dayanımı mikro fiber ve %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren betonlarda görülmektedir. Mikro fiber içermeyen betonların en yüksek basınç dayanımı %5 silis dumanı içeren betonda, mikro fiber ilaveli betonlarda ise, en yüksek basınç dayanımı silis dumanı içermeyen betonda görülmektedir.

Çizelge 4.7. 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin basınç dayanımı sonuçları

| Numuneler | MgSO ₄ numune sayısı | Beton yüzey alanı, A (mm ²) | Yük, P (KN) | Beton basınç dayanımı, f _c (N/mm ²) | Beton basınç dayanımı, Ort. f _c (N/mm ²) |
|----------------------|---------------------------------|---|-------------|--|---|
| SD ₀ B | 1.n | 22500 | 1319 | 58.62 | 57.96 |
| | 2.n | 22500 | 1314 | 58.40 | |
| | 3.n | 22500 | 1279 | 56.84 | |
| SD ₅ B | 1.n | 22500 | 1361 | 60.49 | 61.82 |
| | 2.n | 22500 | 1423 | 63.24 | |
| | 3.n | 22500 | 1389 | 61.73 | |
| SD ₁₀ B | 1.n | 22500 | 1321 | 58.71 | 56.89 |
| | 2.n | 22500 | 1316 | 58.49 | |
| | 3.n | 22500 | 1203 | 53.47 | |
| SD ₁₅ B | 1.n | 22500 | 1219 | 54.18 | 55.19 |
| | 2.n | 22500 | 1255 | 55.78 | |
| | 3.n | 22500 | 1251 | 55.60 | |
| SD ₀ kmB | 1.n | 22500 | 1481 | 65.82 | 65.60 |
| | 2.n | 22500 | 1466 | 65.16 | |
| | 3.n | 22500 | 1481 | 65.82 | |
| SD ₅ kmB | 1.n | 22500 | 1194 | 53.07 | 57.14 |
| | 2.n | 22500 | 1319 | 58.62 | |
| | 3.n | 22500 | 1344 | 59.73 | |
| SD ₁₀ kmB | 1.n | 22500 | 1232 | 54.76 | 50.13 |
| | 2.n | 22500 | 1121 | 49.82 | |
| | 3.n | 22500 | 1031 | 45.82 | |
| SD ₁₅ kmB | 1.n | 22500 | 1106 | 49.16 | 49.59 |
| | 2.n | 22500 | 988 | 43.91 | |
| | 3.n | 22500 | 1253 | 55.69 | |



Şekil 4.13. 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen mikro fiberli ve mikro fibersiz betonların basınç dayanımı ilişkisi

4.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.2.1. Karbonatlaşma deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Elde edilen deney sonuçlarına göre; çimento yerine silis dumanı ikame edildiğinde ve mikro fiber ilaveli betonlarda, karbonatlaşma miktarında azalma görülmektedir. Literatürde bahsedildiği gibi silis dumanı çok ince taneli olduğundan çimento ve agrega arasındaki bağı kuvvetlendirerek mevcut mikro boşlukları kapatıp, daha yoğun mikro yapıya sahip beton oluşturur. Dolayısıyla, beton daha az geçirgen hale gelir ve CO₂'in betona girmesi zorlaşır. Böylece betonun karbonatlaşması uzun zaman alır.

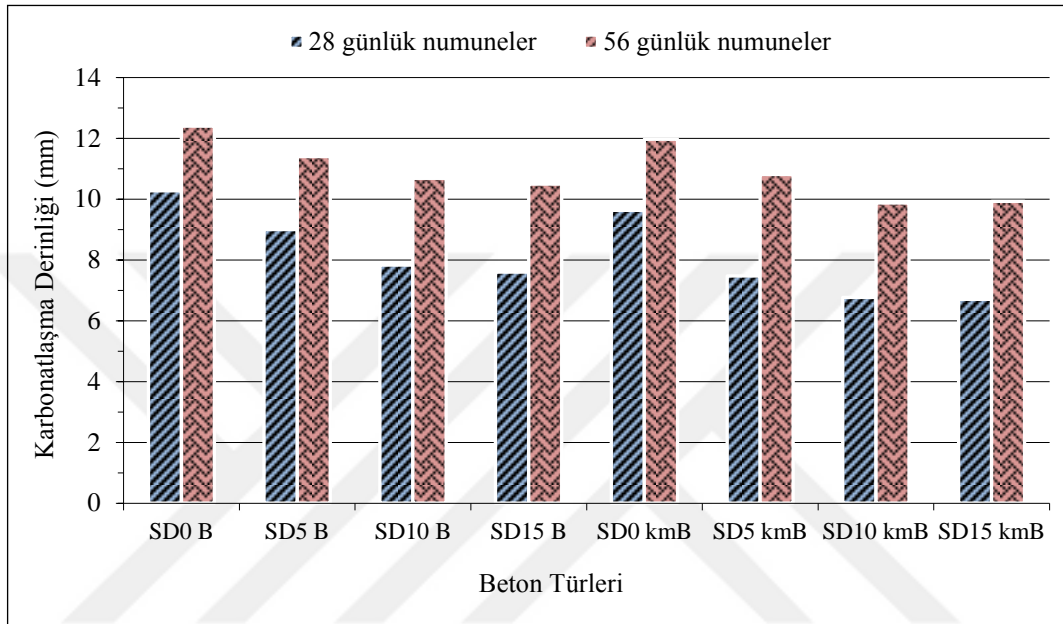
Çizelge 4.8'de 28 ve 56 günlük hızlandırılmış karbonatlaşma testine tabi tutulan numunelerin farklı oranlardaki silis dumanının referans betona göre karbonatlaşma değişim miktarı görülmektedir. 28 günlük SD₅B, SD₁₀B ve SD₁₅B betonları SD₀B betonu ile kıyaslandığında SD₅B, SD₁₀B ve SD₁₅B betonlarda sırasıyla %12, %24 ve %26 karbonatlaşma miktarında düşüş olduğu görülmektedir. Birinci grup betonlara mikro fiber eklendiğinde SD₀kmB'de %6, SD₅kmB'de %27, SD₁₀kmB'de %34 ve SD₁₅kmB'de %35 kadar karbonatlaşma miktarı düşmüştür. 56 günlük SD₅B, SD₁₀B ve SD₁₅B betonları SD₀B betonu ile kıyaslandığında SD₅B'de %8, SD₁₀B'de %14 ve SD₁₅B'de %15, mikro fiber eklendiğinde ise sırasıyla %3, %13 ve %20 kadar karbonatlaşma miktarında bir düşüş görülmektedir.

Çizelge 4.8. Karbonatlaşma derinliklerinin değişim miktarı

| Numuneler | 28 günlük numunelerin karbonatlaşma miktarı (mm) | Kontrol betona göre karbonatlaşmanın azalma oranı (%) | 56 günlük numunelerin karbonatlaşma miktarı (mm) | Kontrol betona göre karbonatlaşmanın azalma oranı (%) |
|----------------------|--|---|--|---|
| SD ₀ B | 10.27 | - | 12.40 | - |
| SD ₅ B | 9.00 | 12 | 11.40 | 8 |
| SD ₁₀ B | 7.83 | 24 | 10.68 | 14 |
| SD ₁₅ B | 7.60 | 26 | 10.50 | 15 |
| SD ₀ kmB | 9.63 | 6 | 11.97 | 3 |
| SD ₅ kmB | 7.47 | 27 | 10.81 | 13 |
| SD ₁₀ kmB | 6.77 | 34 | 9.87 | 20 |
| SD ₁₅ kmB | 6.70 | 35 | 9.93 | 20 |

Karbonatlaşma miktarı beklendiği gibi zamanla artmıştır. 56 günlük numunelerde 28 günlük numunelere kıyasla ortalama olarak 2-3 mm daha fazla karbonatlaşma derinliği görülmüştür.

Şekil 4.14'e bakıldığında silis dumanı ve mikro fiber karbonatlaşmayı azaltma yönünde pozitif etki göstermiştir. Mikro fibersiz örneklerin, mikro fiberli örneklere göre daha çok karbonatlaştığı görülmektedir. Tüm beton grupları incelendiğinde, karbonatlaşma direnci en çok %10, %15 silis dumanı ve mikro fiber içeren betonlarda görülürken, en az karbonatlaşma direnci silis dumanı ve mikro fiber içermeyen betonlarda görülmüştür.



Şekil 4.14. 28 ve 56 günlük numunelerin karbonatlaşma değişim grafiği

Burada silis dumanı, çimento hamurundaki mikro boşlukları ve agrega-çimento ara yüzeyini doldurmasının yanı sıra silis dumanının katılması ile çimentonun ana unsuru olan CaO miktarı betonda düşmektedir. Kimyasal ürün olarak çimentonun CaO miktarı silis dumanından daha fazla olduğu için çimento yerine ikame edilen silis dumanı oranının artması bir yandan da CaO miktarının düşmesinden ibarettir ve bu da CaO karbonatlaşmanın temel unsuru olduğundan karbonatlaşma miktarında düşme göstermektedir. Mikro fiber karbonatlaşmanın azaltılmasında olumlu etkisinin sebebi ise, betonda oluşabilecek çatlakları engelleyerek daha yüksek yapısal bütünlük sağlamaktadır. Aksi durumda beton geçirimsizliğinin artması ve betonun yüzeyinde mikro çatlakların çoğalması, karbonatlaşmanın etki ettiği derinliği artırmaktadır.

4.2.2. Sülfat etkisi deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Değişik karışım oranlarına sahip beton numunelerin basınç dayanımı sonuçları bakıldığında, 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonların, normal suda kür

edilen betonlara göre basınç dayanımı düşmüş, 90 günlük betonların dayanımı ise bir miktar artmıştır. Silis dumanının oranı arttıkça sodyum sülfat çözeltisinde ve normal suda kür edilen betonların basınç dayanımı artış gösterirken, magnezyum sülfat çözeltisinde kür edilen betonların basınç dayanımı düşmüştür. Aynı konsantrasyon seviyesindeki çözeltilerde bekletilen numuneler karşılaştırıldığında magnezyum sülfat çözeltisinin daha fazla dayanım kaybına neden olduğu görülmüştür. Magnezyum sülfat tuzunun, sodyum sülfat tuzundan daha saldırgan olduğu örneklerde hem dış görünüm açısından hem de dayanımı kaybı açısından daha fazla hasara yol açtığı açıkça gözlemlenmiştir. Bu etkinin magnezyum sülfat çözeltisinde hidrate kalsiyum silikat ve çimentonun bağlayıcı özelliğinin kaybolması sonucu gerçekleştiği söylenebilir.

Betonda silis dumanı kullanılması halinde, bir taraftan betonun asit ve sülfat direncinde artış meydana gelmekte, diğer taraftan betonun boşluk oranı azalarak geçirimsizliği sağlanmaktadır. Burada silis dumanının oranı arttıkça betonun sodyum sülfata karşı direnci artmıştır. Sodyum sülfat ataklarına en iyi direnç %10-15'lik bir silis dumanın değişimi ile elde edilmiştir. Öte yandan, silis dumanının oranı arttıkça magnezyum sülfata karşı direnci düşmüştür. Dolayısıyla, magnezyum sülfat gibi ortamlarda beton karışımında yüksek miktarda silis dumanının kullanılması tavsiye edilmemektedir.

Çizelge 4.9'da 28 günlük şahit numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, tüm betonların basınç dayanımı çok yüksek olduğu gözlenmektedir. Betonların dayanımı yüksek olmasının bariz nedeni deneyde ince taneli çimentonun kullanılmasıdır. İnce taneli çimentonun spesifik yüzey alanının yüksek olmasından ve çok küçük parçacık boyutundan dolayı (özgül yüzey değeri $> 800 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ve elekten geçen %95 oranı en büyük tanecik boyutu $D_{95} < 16.0 \mu\text{m}$) kullanımı ile betonun gözenek alanlarını doldurarak daha geçirimsiz ve dayanımı yüksek olan bir beton elde edilir. Bilindiği üzere çimento ne kadar ince olursa betonun dayanımı o kadar yüksek olur. Öte yandan, silis dumanı oranının artması ile birlikte betonun basınç dayanımı daha da artmıştır. En düşük basınç dayanımı silis dumanı içermeyen betonda (SD_0B) görülürken, en yüksek basınç dayanımı $SD_{15}B$ betonunda görülmüştür. Aynı zamanda mikro fiber katkısı betonun basınç dayanımının yükseltmesinde önemli ölçüde etkisi olmuştur. Tüm beton serilerinin basınç dayanımları göz önüne alındığında en yüksek basınç dayanımı %19 değişimle $SD_{10}kmB$ ve $SD_{15}kmB$ betonlarda görülmektedir.

Çizelge 4.9. 28 günlük şahit numunelerin silis dumanının oran değişimine göre basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | Referans numunelerin basınç dayanımı değerleri $f_{ck,28}$ (N/mm ²) | Silis dumanının oran değişimine göre basınç dayanımı % değişimi | Durum |
|----------------------|--|---|-------|
| SD ₀ B | 53.72 | - | - |
| SD ₅ B | 55.39 | % 3 | Artma |
| SD ₁₀ B | 57.11 | % 6 | Artma |
| SD ₁₅ B | 61.93 | % 15 | Artma |
| SD ₀ kmB | 58.27 | % 8 | Artma |
| SD ₅ kmB | 59.85 | % 11 | Artma |
| SD ₁₀ kmB | 63.66 | % 19 | Artma |
| SD ₁₅ kmB | 64.15 | % 19 | Artma |

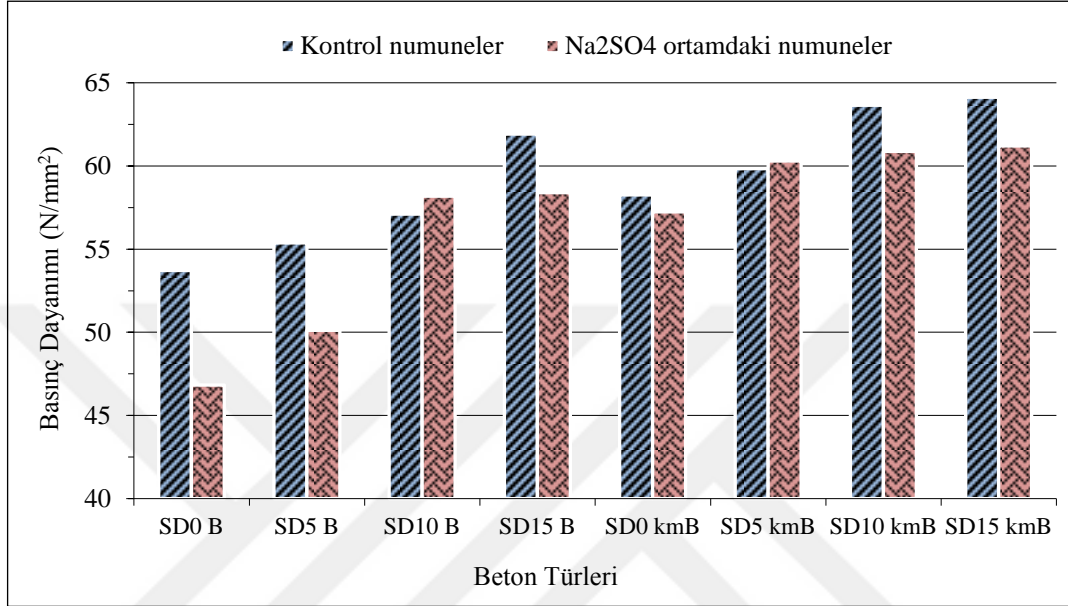
Çizelge 4.10'da 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlar şahit betonlar ile kıyaslandığında SD₀B, SD₅B, SD₁₅B, SD₀kmB, SD₁₀kmB ve SD₁₅kmB betonlarda sırasıyla %13, %10, %6, %2, %4 ve %5 oranlarında dayanım kaybı olmuştur. Diğer taraftan SD₁₀B ve SD₅kmB betonların basınç mukavemetinde %1-2 oranında artış göstermiştir. Burada dayanım kaybı en çok SD₀B betonunda %13 değişimle görülürken, en az dayanım kaybı %2 değişimle SD₀kmB betonunda görülmektedir. Genel anlamda sodyum sülfat tuzu betonda zararlı etkiye sahip olup, beton dayanımını düşürmektedir. Tüm beton numuneler göz önüne alındığında neredeyse tümünde dayanım kaybı olmuştur. SD₁₀B ve SD₅kmB betonları, dayanımda bir miktar artma göstermiş olsa da büyük bir değişim sayılamaz.

Çizelge 4.10. 28 gün sodyum sülfat (Na₂SO₄) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | Referans numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm ²) | Na ₂ SO ₄ ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm ²) | 28 günlük ortalama basınç dayanımı % değişimi | Durum |
|----------------------|---|--|---|--------|
| SD ₀ B | 53.72 | 46.84 | % 13 | Azalma |
| SD ₅ B | 55.39 | 50.12 | % 10 | Azalma |
| SD ₁₀ B | 57.11 | 58.19 | % 2 | Artma |
| SD ₁₅ B | 61.93 | 58.40 | % 6 | Azalma |
| SD ₀ kmB | 58.27 | 57.24 | % 2 | Azalma |
| SD ₅ kmB | 59.85 | 60.31 | % 1 | Artma |
| SD ₁₀ kmB | 63.66 | 60.89 | % 4 | Azalma |
| SD ₁₅ kmB | 64.15 | 61.21 | % 5 | Azalma |

Şekil 4.15'te sodyum sülfat çözeltisinde kür edilen numunelerin kontrol numunelere kıyasla basınç mukavemetinde meydana gelen azalma oranı görülmektedir.

Aynı zamanda silis dumanı oranı arttıkça betonların sodyum sülfata karşı direncinin arttığı gözlenmektedir. Sodyum sülfat numunelerde mukavemetin azalma sebebi sodyum sülfat nedeni ile oluşan etrenjit yapısı olabilir. Etrenjit genişleme ve mikro çatlaklar oluşturarak dayanım kaybına sebep olmaktadır. Sodyum sülfat betonlarda zararlı etkiye sahiptir. Fakat, magnezyum sülfatın zararlı etkisi kadar büyük değildir.



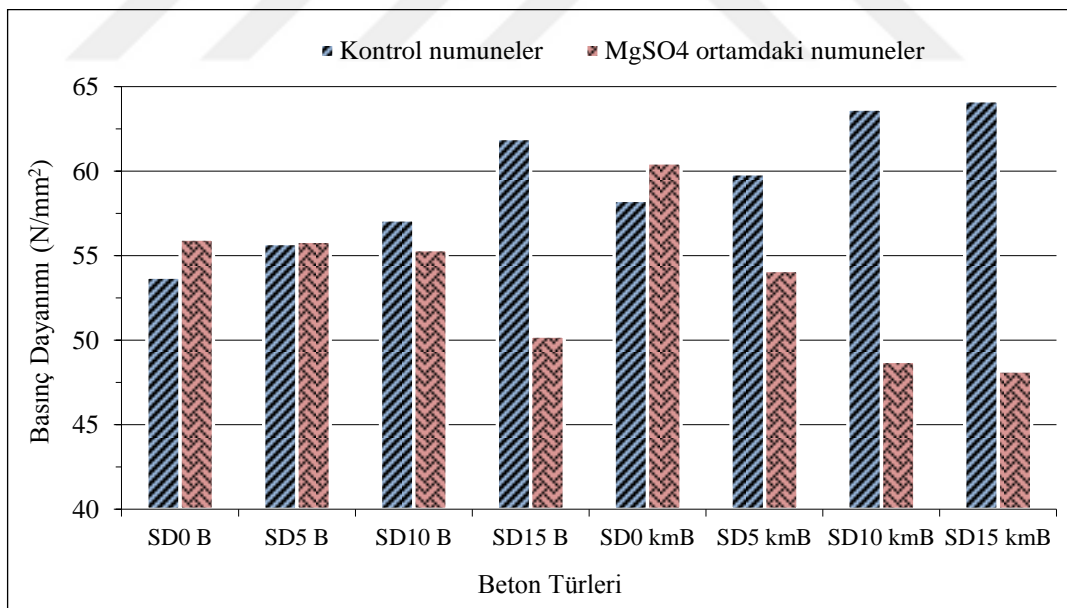
Şekil 4.15. 28 günlük sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları

Çizelge 4.11’de magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı yüzde değişimi görülmektedir. 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlar şahit betonlar ile kıyaslandığında SD₁₀B, SD₁₅B, SD₅kmB, SD₁₀kmB ve SD₁₅kmB betonlarda sırasıyla %3, %19, %10, %23 ve %25 oranlarında dayanım kaybı, SD₀B, SD₅B ve SD₀kmB betonlarda %1 ve %4 kadar dayanımda artma görülmektedir. Burada tüm beton karışımları göz önüne alındığında en çok dayanım kaybı SD₁₅B, SD₁₀kmB ve SD₁₅kmB betonlarda olmuştur. Buradaki dikkat çekilecek başka bir husus, silis dumanı oranının artmasıyla magnezyum sülfattaki zararlı etki daha da büyük olmuştur. Bu nedenle test sonuçları, literatüre uyumlu olarak silis dumanının magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalan betonlarda kullanılmasının önerilmediği açıkça gösterilmiştir. Ayrıca, magnezyum sülfat gibi ortamlarda silis dumanı ile birlikte mikro fiber kullanılması basınç dayanımını daha çok düşürmektedir. Dolayısıyla, betonda silis dumanı ve mikro fiber kombinasyonunun kullanımı magnezyum sülfatlı ortamlarda uygun olmadığı gösterilmektedir.

Çizelge 4.11. 28 gün magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | Referans numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm^2) | $MgSO_4$ ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm^2) | 28 günlük ortalama basınç dayanımı % değişimi | Durum |
|----------------------|--|--|---|--------|
| SD ₀ B | 53.72 | 55.99 | % 4 | Artma |
| SD ₅ B | 55.39 | 55.85 | % 1 | Artma |
| SD ₁₀ B | 57.11 | 55.36 | % 3 | Azalma |
| SD ₁₅ B | 61.93 | 50.25 | % 19 | Azalma |
| SD ₀ kmB | 58.27 | 60.49 | % 4 | Artma |
| SD ₅ kmB | 59.85 | 54.13 | % 10 | Azalma |
| SD ₁₀ kmB | 63.66 | 48.76 | % 23 | Azalma |
| SD ₁₅ kmB | 64.15 | 48.19 | % 25 | Azalma |

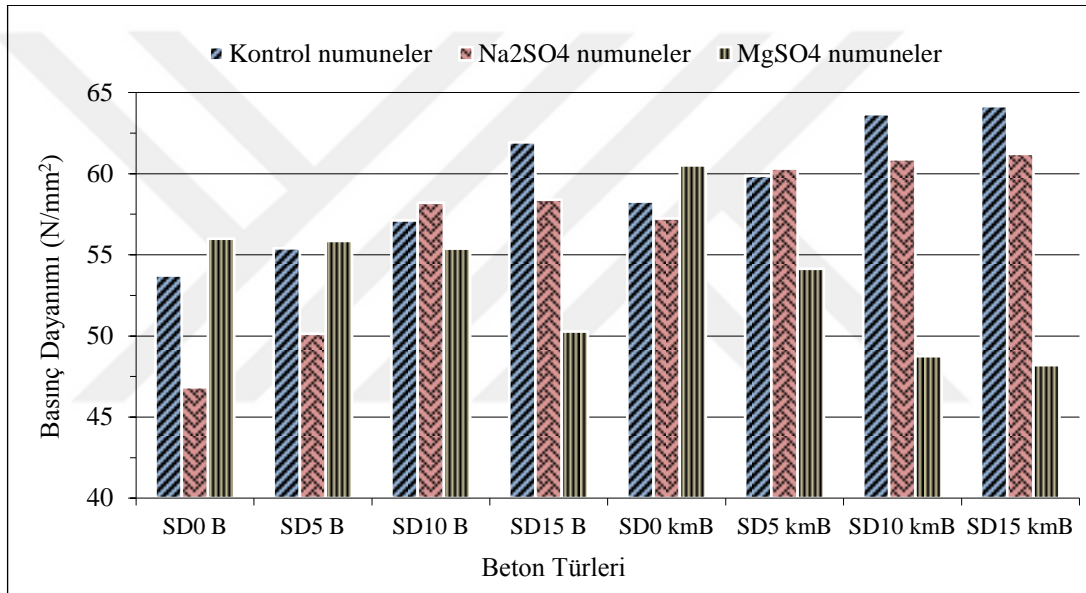
Şekil 4.16'da 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler kontrol numunelere kıyasla basınç mukavemetinde meydana gelen azalma oranı görülmektedir. Magnezyum sülfat, sodyum sülfattan daha çok dayanım kaybına neden olması sadece etrenjit oluşumuna kalmayıp aynı zamanda çimentonun bağlayıcılık özelliğini de azaltmaktadır.



Şekil 4.16. 28 günlük magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları

Şekil 4.17'de 28 günlük şahit betonların ve sodyum sülfat, magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilen betonların mukavemet değerleri grafik üzerinde görülmektedir. Şahit numuneler, sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelere kıyasla basınç dayanımı yüksektir. Beton türüne göre basınç dayanımı değişiklik

gösterse de sülfatlı sularda bekletilen betonlarda dayanım kaybı açıkça gözlenmektedir. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfata maruz kalan numunelerin basınç dayanımı arasında ters bir ilişki görülmektedir. Silis dumanının artması ile sodyum sülfata maruz kalan numuneler basınç dayanımı artan bir grafiği izlerken magnezyum sülfata maruz kalan numuneler azalan bir grafiği izlemektedir. Burada, tüm numuneler göz önüne bulundurulduğunda en yüksek basınç dayanımı SD₁₅kmB kontrol betonunda, en az basınç dayanımı ise SD₀B sodyum sülfat çözeltisinde maruz kalan betonda görülmektedir. Bu sonuçlara göre; sodyum sülfat ortamlarında silis dumanı kullanılması tavsiye edilebilir fakat magnezyum sülfat ortamlarda tavsiye edilmemektedir. Magnezyum sülfat gibi ortamlarda betonun dayanımını artırmak yerine düşürmektedir.

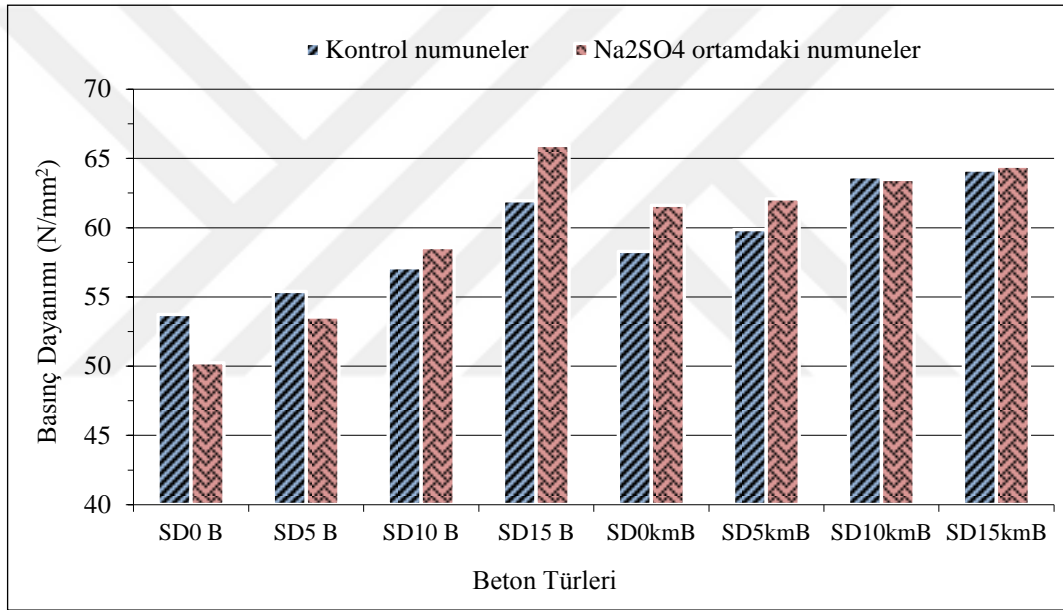


Şekil 4.17. 28 günlük sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları

Çizelge 4.12’de 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlar 28 günlük şahit betonlar ile kıyaslandığında SD₀B ve SD₅B betonlarda %6 ve %3 oranlarında dayanım kaybı olmuştur. SD₁₀B, SD₁₅B, SD₀kmB ve SD₅kmB betonlarda sırasıyla %3, %6, %6 ve %4 kadar basınç dayanımı artmıştır. SD₁₀kmB ve SD₁₅kmB betonların basınç dayanımında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Burada SD₀B betonunda %6 değişimle en çok dayanım kaybı görülürken, aksine en çok dayanım kazancı %6 değişimle SD₀kmB ve SD₁₅B betonlarında görülmektedir. Şekil 4.18’de görüldüğü üzere 90 günlük numuneler 28 günlük numunelere benzer şekilde silis dumanı oranı arttıkça betonların basınç dayanımı da artmıştır.

Çizelge 4.12. Referans betonlara göre 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | Referans numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm ²) | Na ₂ SO ₄ ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,90}$ (N/mm ²) | 90 günlük ortalama basınç dayanımı % değişimi | Durum |
|----------------------|--|---|---|-------------|
| SD ₀ B | 53.72 | 50.24 | % 6 | Azalma |
| SD ₅ B | 55.39 | 53.53 | % 3 | Azalma |
| SD ₁₀ B | 57.11 | 58.56 | % 3 | Artma |
| SD ₁₅ B | 61.93 | 65.93 | % 6 | Artma |
| SD ₀ kmB | 58.27 | 61.60 | % 6 | Artma |
| SD ₅ kmB | 59.85 | 62.06 | % 4 | Artma |
| SD ₁₀ kmB | 63.66 | 63.47 | % 0 | Değişim yok |
| SD ₁₅ kmB | 64.15 | 64.43 | % 0 | Değişim yok |



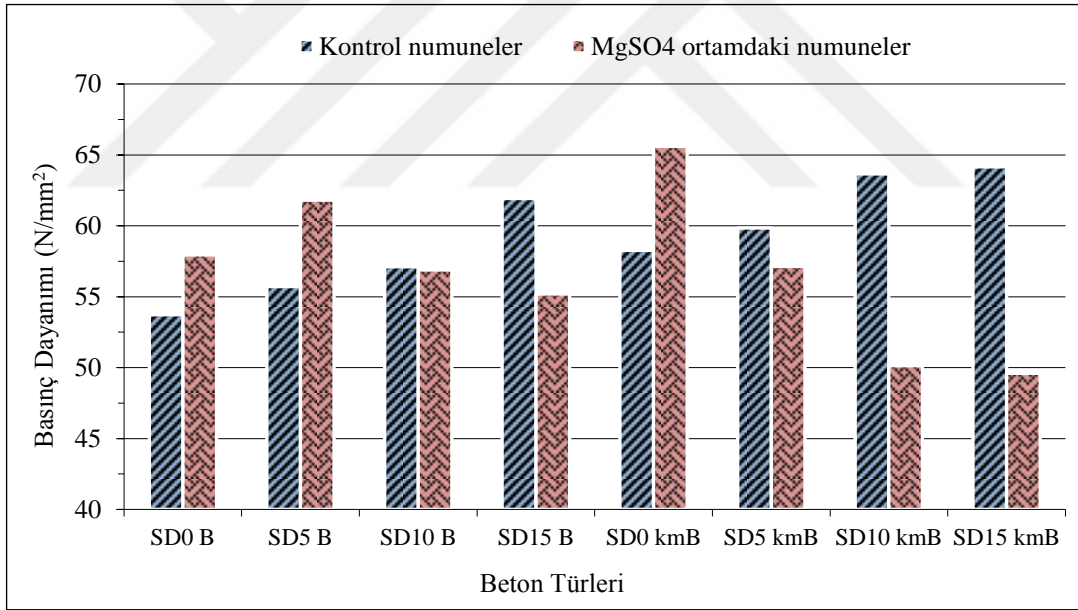
Şekil 4.18. 90 günlük sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları

Çizelge 4.13'te 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlar şahit betonlar ile kıyaslandığında SD₁₅B, SD₅kmB, SD₁₀kmB ve SD₁₅kmB betonlarda sırasıyla %11, %5, %21 ve %23 oranlarında dayanım kaybı, SD₀B, SD₅B ve SD₀kmB betonlarda sırasıyla %8, %12 ve %13 kadar dayanımda artma görülmektedir. Burada tüm beton karışımları göz önüne alındığında en çok dayanım kaybı SD₁₀kmB ve SD₁₅kmB betonlarda, en yüksek basınç dayanımı ise SD₀kmB betonda gözlenmektedir. Şekil 4.19'da görüldüğü gibi 90 günlük numuneler, 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelere benzer şekilde silis dumanı oranının artmasıyla magnezyum sülfattaki zararlı etki daha da büyük olmuştur. Silis dumanı içeren yüksek

dayanımlı betonun sodyum sülfat saldırısına karşı en etkili olmasına rağmen, silis dumanı oranı arttıkça magnezyum sülfat saldırısına karşı direnci düşmektedir.

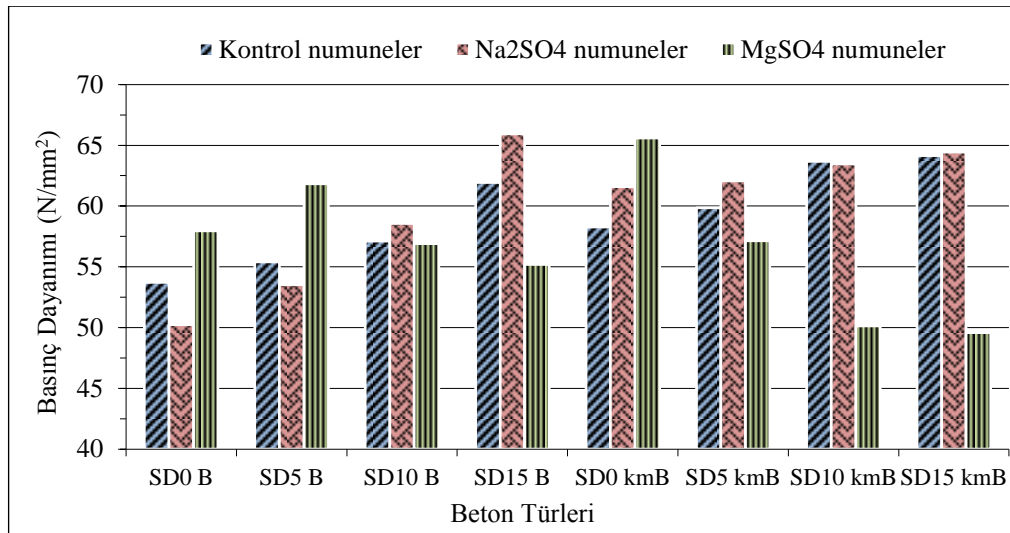
Çizelge 4.13. Referans betonlara göre 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | Referans numunelerin basınç dayanımı değerleri, | MgSO ₄ ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, | 90 günlük ortalama basınç dayanımı % değişimi | Durum |
|----------------------|---|--|---|-------------|
| | $f_{ck,28}$ (N/mm ²) | $f_{ck,90}$ (N/mm ²) | | |
| SD ₀ B | 53.72 | 57.96 | % 8 | Artma |
| SD ₅ B | 55.39 | 61.82 | % 12 | Artma |
| SD ₁₀ B | 57.11 | 56.89 | % 0 | Değişim yok |
| SD ₁₅ B | 61.93 | 55.19 | % 11 | Azalma |
| SD ₀ kmB | 58.27 | 65.60 | % 13 | Artma |
| SD ₅ kmB | 59.85 | 57.14 | % 5 | Azalma |
| SD ₁₀ kmB | 63.66 | 50.13 | % 21 | Azalma |
| SD ₁₅ kmB | 64.15 | 49.59 | % 23 | Azalma |



Şekil 4.19. 90 günlük magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen ve şahit betonların basınç dayanımları

Şekil 4.20’de 28 günlük şahit betonların ve 90 gün sodyum sülfat, magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonların mukavemet değerleri grafik ilişkileri görülmektedir. Burada tüm numuneler göz önüne bulundurulduğunda en yüksek basınç dayanımı 90 günlük SD₀kmB magnezyum sülfat ve 90 günlük SD₁₅B sodyum sülfata maruz kalan betonda, en az basınç dayanımı ise 90 günlük SD₁₅kmB magnezyum sülfata maruz kalan betonda görülmektedir.

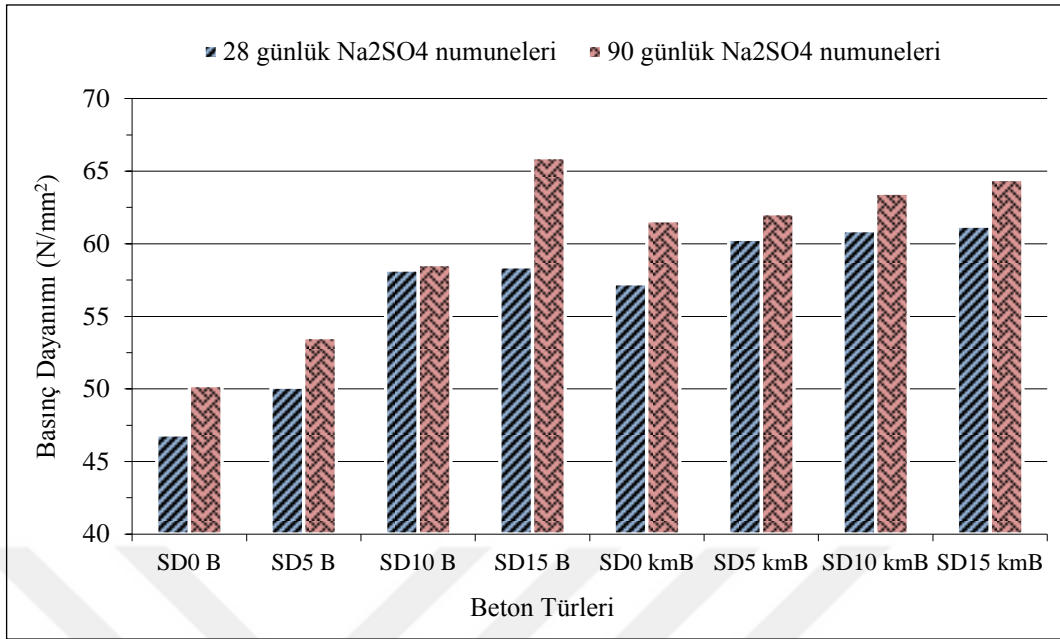


Şekil 4.20. 90 günlük sodyum sülfat-magnezyum sülfat-şahit betonların basınç dayanımları

Çizelge 4.14 incelendiğinde, 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen tüm beton karışımların serbest basınç mukavemetinde artma görülmektedir. Burada mikro fiber içermeyen betonlarda silis dumanının oranı arttıkça basınç dayanımı hızla artış göstermiştir. Mikro fiber eklendiğinde ise dayanım farkı daha az olmuştur. 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlar 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarla kıyaslandığında en yüksek mukavemet oranı %13 değişimle SD₁₅B betonda ve en az basınç mukavemeti 28 günlük SD₀B betonunda görülmektedir. SD₁₀B betonun basınç dayanımında neredeyse hiçbir değişiklik olmamıştır. Normalde betonlar sülfatlı ortamlarda kaldığı zaman dayanımında düşme beklenmektedir. Buradaki tüm betonların basınç dayanımının artış sebebi sülfat konsantrasyonunun az olması ya da yaş faktörü olabilir. Şekil 4.21’de görüldüğü üzere betonların 90 gün eskitme süresi %2 Na₂SO₄ konsantrasyonu için yeterli olmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.14. 28 günlük sodyum sülfat (Na₂SO₄) çözeltisinde bekletilen betonlara göre 90 gün sodyum sülfat (Na₂SO₄) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | 28 günlük Na ₂ SO ₄ ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm ²) | 90 günlük Na ₂ SO ₄ ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,90}$ (N/mm ²) | Basınç dayanımında meydana gelen artış oranı, (%) |
|----------------------|---|---|---|
| SD ₀ B | 46.84 | 50.24 | % 7 |
| SD ₅ B | 50.12 | 53.53 | % 7 |
| SD ₁₀ B | 58.19 | 58.56 | % 1 |
| SD ₁₅ B | 58.4 | 65.93 | % 13 |
| SD ₀ kmB | 57.24 | 61.60 | % 8 |
| SD ₅ kmB | 60.31 | 62.06 | % 3 |
| SD ₁₀ kmB | 60.89 | 63.47 | % 4 |
| SD ₁₅ kmB | 61.21 | 64.43 | % 5 |

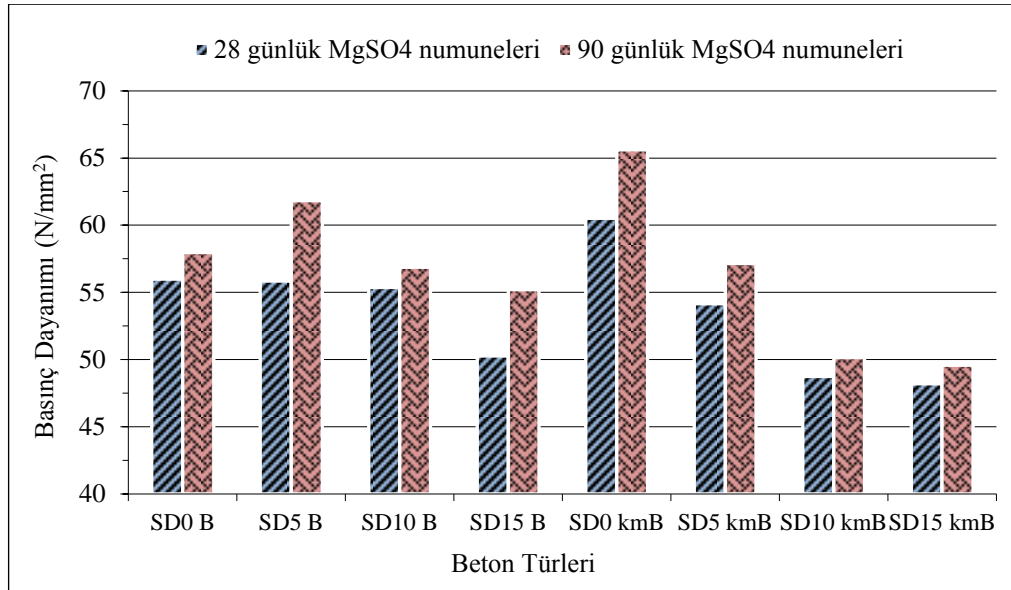


Şekil 4.21. 28 ve 90 gün sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisinde kür edilen betonların basınç dayanımları

Çizelge 4.15 ve Şekil 4.22 incelendiğinde 90 gün magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisinde bekletilen tüm beton karışımları 28 günlüğe oranla serbest basınç mukavemetinde artma görülmektedir. Burada 90 günlük numuneler 28 günlük numuneler ile kıyaslandığında en yüksek basınç dayanımı %10 ve %11 değişimle SD_5B ve SD_{15}B betonlarda, en az değişim ise %3 oranıyla SD_{10}B , SD_{10}kmB ve SD_{15}kmB betonlarda görülmektedir.

Çizelge 4.15. 28 günlük magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisinde bekletilen betonlara göre 90 gün magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisinde bekletilen betonlarda meydana gelen basınç dayanımı % değişimi

| Kodlar | 28 günlük MgSO_4 ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,28}$ (N/mm^2) | 90 günlük MgSO_4 ortamdaki numunelerin basınç dayanımı değerleri, $f_{ck,90}$ (N/mm^2) | Basınç dayanımında meydana gelen artış oranı, (%) |
|-----------------------------|--|--|---|
| $\text{SD}_0\text{ B}$ | 55.99 | 57.96 | % 4 |
| $\text{SD}_5\text{ B}$ | 55.85 | 61.82 | % 11 |
| $\text{SD}_{10}\text{ B}$ | 55.36 | 56.89 | % 3 |
| $\text{SD}_{15}\text{ B}$ | 50.25 | 55.19 | % 10 |
| $\text{SD}_0\text{ kmB}$ | 60.49 | 65.60 | % 8 |
| $\text{SD}_5\text{ kmB}$ | 54.13 | 57.14 | % 6 |
| $\text{SD}_{10}\text{ kmB}$ | 48.76 | 50.13 | % 3 |
| $\text{SD}_{15}\text{ kmB}$ | 48.19 | 49.59 | % 3 |

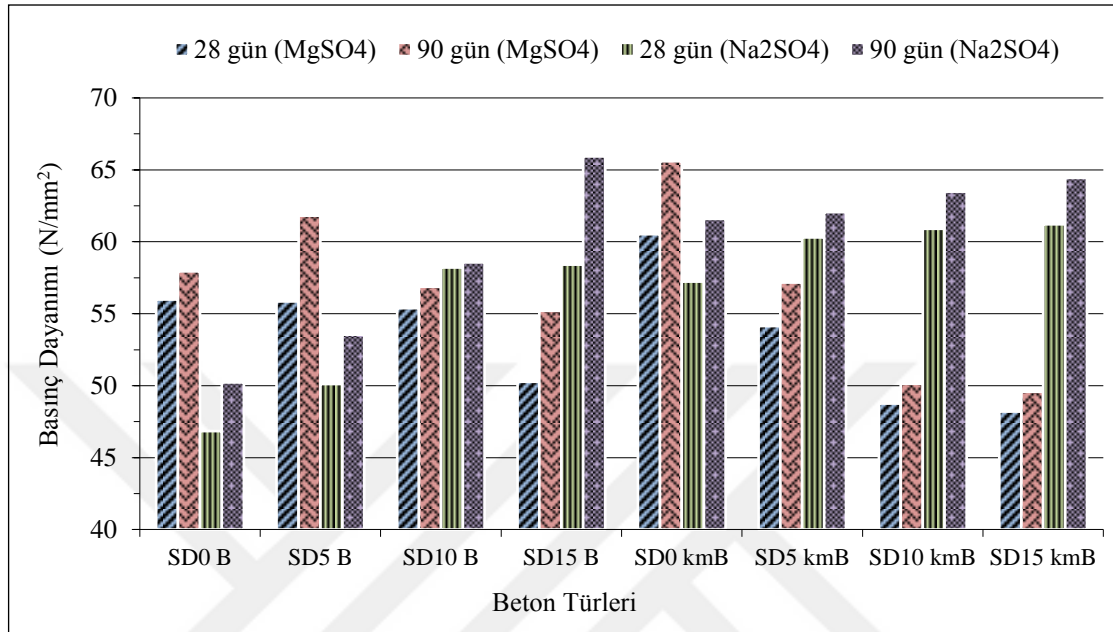


Şekil 4.22. 28 ve 90 gün magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltisinde kür edilen betonların basınç dayanımları

28 günlük basınç mukavemeti sonuçlarında %2 Na₂SO₄ ve %2 MgSO₄ konsantrasyonlarının kontrole oranla azalma, 90 günlük basınç mukavemeti sonuçlarında %2 Na₂SO₄ ve %2 MgSO₄ konsantrasyonlarının 28 günlüğüne oranla artış göstermiştir. Buradaki fark çimento hidratasyonu sonucunda etrenjit jelin oluşmasından kaynaklanıyor olabilir. Etrenjit uzun zaman içerisinde betonda hacimsel genişlemeye sebep olsa da çimentoya mukavemet kazandırır. Etrenjit oluşumu belli bir konsantrasyona kadar betonun içyapısında hasara yol açmaz, tersine betonda boşluk tıkama sebebiyle bir miktar dayanım kazandırır. Dolayısıyla, belli miktarın altındaki etrenjitle dayanım veya genişleme arasında ilişki kurmak pek sağlıklı olmayabilir. Betonda sülfat difüzyonu sürekli devam etmesi halinde, boşluk yapısına bağlı olarak etrenjit oluşumundaki doygunlukla birlikte hızlı bir genişleme meydana gelir.

Etrenjit jeli oluşumunun yanı sıra 90 günlük betonların basınç dayanımındaki artış sebebi yaş parametresi olabilir. Ayrıca, literatür çalışmasında belirtildiği üzere sülfat etkisi uzun süreli olduğundan 28 ve 90 günlük numunelerin basınç mukavemetine düşük konsantrasyonları çok etkilememektedir. Burada %2 Na₂SO₄ ve %2 MgSO₄ konsantrasyonu düşük olduğunu göstermektedir. 28 ve 90 gün sodyum ve magnezyum sülfat suyunda bekletilen numunelerin basınç değerlerin grafik ilişkisi Şekil 4.23'te verilmiştir. Burada tüm beton numuneler dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımı 90 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen SD₁₅B betonda ve 90 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen SD₀kmB betonda görülmektedir. Diğer taraftan en az basınç dayanımı 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen SD₀B betonda ve 28 gün

magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen $SD_{10}kmB$ ve $SD_{15}kmB$ betonlarda görülmektedir. Betonda magnezyum sülfatın daha çok zararlı olması sebebi ise CSH'tan ayrıca magnezyum silika hidrat (MSH) jelinin de oluşmasıdır. Bu da alçıtaşı oluşumunun artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.23. 28 ve 90 gün sülfat çözeltilerinde kür edilen betonların basınç dayanımları

4.2.3. Sülfat analiz sonuçları ve değerlendirilmesi

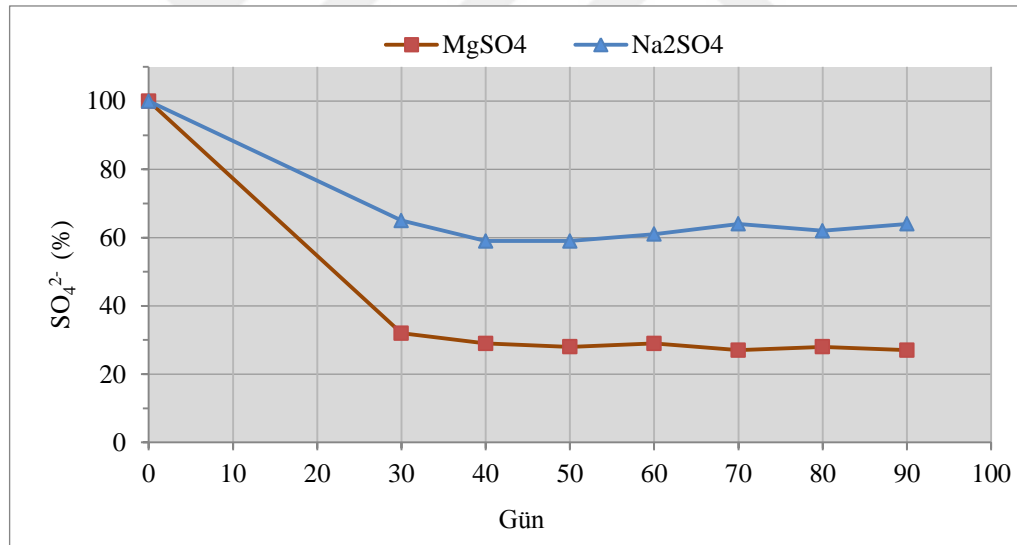
Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinden zamana bağlı düzenli olarak alınan numuneler üzerinde sülfat analizi yapılmıştır. Böylece sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinde, sülfat konsantrasyonunun suda ne kadar azaldığı takip edilmiştir.

Çizelge 4.16 incelendiğinde aynı konsantrasyonlardaki magnezyum sülfat ($MgSO_4$) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) analiz değerleri arasında çok büyük fark görülmektedir. Magnezyum sülfatın SO_4^{2-} iyonu, sodyum sülfata göre daha fazla olmasına rağmen, daha çok betonda emildiği ve zaman ilerledikçe daha küçük değerlere indiği açıkça gözlenmektedir. Dolayısıyla, magnezyum sülfatın yaptığı reaksiyonlar ile betonda yarattığı zararlı etkisi beton dayanımını düşürmesinin yanı sıra SO_4^{2-} iyonun azalmasından da anlaşılmaktadır. Deneyde HACH DR/4000U Spektrofotometrede okunan sülfat iyonu değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Sülfat tayini sonuçları

| Gün | MgSO ₄ | | Na ₂ SO ₄ | |
|-----|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (%) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (%) |
| 0 | 16000 | 100 | 13521 | 100 |
| 30 | 5120.4 | 32 | 8785 | 65 |
| 40 | 4568.2 | 29 | 8032 | 59 |
| 50 | 4442.7 | 28 | 7981.8 | 59 |
| 60 | 4618.4 | 29 | 8182.6 | 61 |
| 70 | 4267 | 27 | 8709.7 | 64 |
| 80 | 4442.7 | 28 | 8333.2 | 62 |
| 90 | 4367.4 | 27 | 8709.7 | 64 |

Şekil 4.24'te sülfat analiz sonuçları grafiğine bakıldığında, her iki sülfat konsantrasyonunda ilk 30 gün sülfat tükenmesi hızla artmıştır. Daha sonra artış oranı, beton gözeneklerinde etrenjit oluşumunun bir sonucu olarak iyonların difüzyonu ilerdeki yaşlarda yavaş yavaş azalmıştır.



Şekil 4.24. Sülfat analizi grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada ince taneli çimento ve farklı oranlarda silis dumanı (%0, 5, 10 ve 15) ile mikro fiberli ve mikro fibersiz olmak üzere çeşitli kombinasyonlar elde edilerek üretilen betonlarda karbonatlaşmanın ve sülfatların etkisi araştırılmıştır. Deney neticesinde elde edilen belli başlı sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Betonda silis dumanı ve mikro fiber katkılarının ilave edilmesi karbonatlaşmayı azaltma yönünde olumlu etki göstermiştir. Silis dumanı çok ince taneli olduğundan çimento agrega ara yüzeyini ve betondaki mikro boşlukları doldurarak, bir yandan daha dayanıklı ve geçirimsiz bir beton oluştururken, diğer yandan sertleşmiş betonda alkali-silika reaksiyonunu azaltarak betonun kimyasal dayanıklılığını artırır. Mikro fiber karbonatlaşmanın azaltılmasında olumlu etkisinin sebebi ise betonda oluşabilecek çatlakları engelleyerek daha yüksek yapısal bütünlük sağlamaktadır.
- 28 ve 56 gün yoğunlaştırılmış CO₂'e maruz bırakılan numunelerde, karbonatlaşma direnci en çok mikro fiber ve %10, %15 silis dumanı içeren betonlarda görülmüştür. Ayrıca, Karbonatlaşma miktarı beklendiği gibi zaman arttıkça tüm numunelerde artma meydana gelmiştir. 56 günlük numuneler, 28 günlük numunelere kıyasla ortalama olarak 2-3 mm daha fazla karbonatlaşma derinliği göstermiştir.
- Tüm beton numunelerin basınç mukavemeti, silis dumanının oranına bağlı değişiklik gösterse de hedeflenen C25/30 beton sınıfından çok daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bunun bariz nedeni betonda ince taneli çimentonun kullanılmasıdır.
- Silis dumanı ve mikro fiber katkılarının kombinasyonu sodyum sülfat gibi ortamlarda beton basınç dayanımını artırırken, magnezyum sülfat gibi ortamlarda beton basınç dayanımını düşürdüğünün kanısına varılmıştır.
- 28 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda en çok dayanım kaybı %13 değişimle SD₀B betonunda ve en az dayanım kaybı %2 değişimle SD₀kmB betonda görülmüştür. Diğer taraftan 28 gün magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen betonlarda en fazla dayanım kaybı %25 değişimle SD₁₅kmB

betonunda görülürken, en az dayanım kaybı %3 değişimle SD₁₀B betonunda görülmüştür.

- 90 gün sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilen betonların, 28 günlük betonlara oranla basınç dayanımı artmıştır. 90 gün sodyum sülfat çözeltilerinde bekletilen betonun en yüksek basınç dayanımı SD₁₅B'de ve 90 gün magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilen betonun en yüksek basınç dayanımı ise SD₀kmB'de görülmüştür.
- Sülfat iyonlarının konsantrasyonu ilk 30 gün boyunca başlangıçta betonda hızla artmıştır ve daha sonra artış oranı, beton gözeneklerinde etrenjit oluşumunun bir sonucu olarak iyonların difüzyonu yavaş yavaş azalmıştır.

5.2. Öneriler

- Bundan sonraki çalışmalarda %15'tan daha yüksek oranlarda silis dumanı ve farklı oranlarda mikro fiber kullanılarak karbonatlaşmanın etkisi araştırılabilir. Karbonatlaşma deneyinde zaman faktörü çok önemlidir. Dolayısıyla, bu deney düzeneğinde karbonatlaşmanın hızla geliştiği, yavaşladığı ve durduğu anı iyi bilinmelidir.
- Bu çalışmada ince taneli çimento kullanılmıştır. Farklı tip çimento ile farklı oranlarda silis dumanı kombinasyonları oluşturularak karbonatlaşma ve sülfat etkisi araştırılabilir. Özellikle sülfat gibi ortamlarda kullanılan sülfata dayanıklı çimento ile kıyaslama yapılabilir.
- Bu çalışmada, 90 gün sülfat etkisinde maruz kalan numunelerin dayanımında düşme beklenirken, aksine bir miktar artış göstermiştir. Sonraki çalışmalarda sülfatın zararlı etkisi anlaşılabilmesi açısından eskitme süresi uzatılabilir ya da daha yüksek sülfat konsantrasyonları denenebilir.

KAYNAKLAR

- Aguiar, J. B. ve Júnior, C., 2013, Carbonation of surface protected concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 478-483.
- Akçaözöglü, K., 2007, Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi.
- Akman, M. S., 1997, Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri, *Türkiye İnşaat Mühendisliği*, 14.
- Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M., Sharif, A., Shameem, M. ve Ibrahim, M., 2003, Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate, *Cement and Concrete Composites*, 25 (4-5), 429-437.
- Alişer, B., Yıldız, S. ve Keleştemur, O., 2016, Cam lif takviyeli çimento harçlarının sülfat direncine mermer tozu ilavesinin etkisi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (2).
- Arel, H. Ş. ve Thomas, B. S., 2017, The effects of nano-and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks, *Results in physics*, 7, 843-851.
- Arslan, K. M., 2014, Sülfat etkisine maruz kalmış mineral ve nano katkılı harçların durabilitesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Association, A. P. H., Association, A. W. W., Federation, W. P. C. ve Federation, W. E., 1915, Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association., p.
- Atiş, C., Özcan, F., Karahan, O., Bilim, C., Sevim, U. ve Demir, A., 2004, Silis Dumanı Kullanımının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 54-59.
- Atiş, C. D., Karahan, O., Bilim, C., Özcan, F. ve Sevim, U. K., 2016, Sodyum sülfat ile aktifleştirilen uçucu kül katkılı harçların özellikleri, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5 (2), 117-123.
- Baharavar, S., 2016, Uçucu kül tipi ile ortam koşullarının beton karbonatlaşmasına etkisi ve kendiliğinden iyileşmesinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, Ankara.
- Baharavar, S. R., 2012, Karbonatlaşmanın çelik lifli ve uçucu küllü betonlarda etkisi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Benli, A., Karataş, M. ve Gurses, E., 2017, Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume, *Construction and Building Materials*, 146, 464-474.

- Bilodeau, A. ve Malhotra, V. M., 2000, High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development, *Materials Journal*, 97 (1), 41-48.
- Canpolat, F. ve Yılmaz, K., 2002, Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı, *Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 16 (2).
- Chang, C.-F. ve Chen, J.-W., 2006, The experimental investigation of concrete carbonation depth, *Cement and Concrete Research*, 36 (9), 1760-1767.
- Choudhary, A., Malik, M., Tiwari, S., Sharma, U. ve Kumar, A., 2018, Concrete deterioration due to sulphate-A case study, *Materials Today: Proceedings*, 5 (9), 17952-17957.
- De Ceukelaire, L. ve Van Nieuwenburg, D., 1993, Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 23 (2), 442-452.
- De Weerd, K., Orsáková, D. ve Geiker, M. R., 2014, The impact of sulphate and magnesium on chloride binding in Portland cement paste, *Cement and Concrete Research*, 65, 30-40.
- Diab, A. M., Awad, A. E. M., Elyamany, H. E. ve Elmoaty, A. E. M. A., 2012, Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 36, 311-318.
- Dikme, D., 2010, Doğal sülfat içeriği yüksek olan kumlarla üretilen harçlarda sülfat etkisinin incelenmesi ve mineral katkıların etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Doğan, Ü. A., 2008, Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Dotto, J., De Abreu, A., Dal Molin, D. ve Müller, I., 2004, Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars, *Cement and Concrete Composites*, 26 (1), 31-39.
- Duval, R. ve Kadri, E., 1998, Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cement and Concrete Research*, 28 (4), 533-547.
- Erdoğan, T., 1995, Betonun oluşturan malzemeler; Agregalar T.H.B.B., Ankara.
- Eren, F., 2016, Polimer katkılı tamir harçlarının sülfat etkilerine dayanıklılığı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir*.
- Göktepe, M., 2008, C3a oranı farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Gönen, T., 2003, Betonda sıkıştırma faktörünün karbonatlaşmaya etkisi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*,

- Gülan, L., Yıldız, S. ve Keleştemur, O., 2016, Atık mermer tozu ve cam lif katkılı betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine karbonatlaşmanın etkisi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (2).
- Gündeşli, U., 2008, Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufun beton ve çimento katkısı olarak kullanımını üzerine bir kaynak taraması, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- İlca, T., 2008, Farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- İlter, E., 2007, Cem I 42.5 Çimentolu Yüksek Dozajlı Betonlarda Silis Dumanının Etkinliği, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kara, C., 2013, Mermer tozu atığının betonun karbonatlaşmasına etkisinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara*.
- Kardeşler, A., 2005, Karışım suyunda bulunan magnezyum sülfat tuzunun uçucu küllü betonun özelliklerine etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Khan, M. I. ve Lynsdale, C., 2002, Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 32 (1), 123-131.
- Kılınç, K., 2003, Beton karışım suyundaki magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve sodyum sülfür tuzlarının taze ve sertleşmiş çimento harcı özelliklerine etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kulakowski, M. P., Pereira, F. M. ve Dal Molin, D. C., 2009, Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (3), 1189-1195.
- Kuyumcu, M., 2006, Deniz suyu ve sülfat suların betona dayanımına etkisi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Malzemeleri Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 134s, Sakarya*.
- Liang, M. T., Qu, W. J. ve Liao, Y. S., 2000, A study on carbonation in concrete structures at existing cracks, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 23 (2), 143-153.
- Liu, Z., Hu, W., Pei, M. ve Deng, D., 2018, The role of carbonation in the occurrence of MgSO₄ crystallization distress on concrete, *Construction and Building Materials*, 192, 167-178.
- Maes, M. ve De Belie, N., 2017, Influence of chlorides on magnesium sulphate attack for mortars with Portland cement and slag based binders, *Construction and Building Materials*, 155, 630-642.
- Malami, S. I., 2014, Experimental investigations on the extent of carbonation problem in reinforced concrete buildings of north cyprus, *Near East University*.

- Marciniak, A., Grymin, W., Margiewicz, T. ve Koniorczyk, M., 2017, Influence of freezing-induced damage on the carbonation rate of concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21 (10), 1285-1300.
- Merah, A. ve Krobba, B., 2017, Effect of the carbonation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, 148, 874-886.
- Mohamed, H. A., 2011, Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, *Ain Shams Engineering Journal*, 2 (2), 79-86.
- Morandea, A., Thiery, M. ve Dangla, P., 2014, Investigation of the carbonation mechanism of CH and CSH in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cement and Concrete Research*, 56, 153-170.
- Najjar, M., Nehdi, M., Soliman, A. ve Azabi, T., 2017, Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 137, 141-152.
- Neville, A. M., 2004, Properties of concrete, Pearson Prentice Hall, p.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W. ve Chaipanich, A., 2010, Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete, *Fuel*, 89 (3), 768-774.
- Özcan, F. ve Atış, C. D., 2017, Silis dumanı ile üretilen harçların karbonatlaşma ve rötre özellikleri, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 634-641.
- Özer, Ş., 2012, Farklı çimentoların betondaki karbonatlaşmaya etkisinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.
- Park, D., 2008, Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings, *Construction and Building Materials*, 22 (11), 2260-2268.
- Possan, E., Thomaz, W. A., Aleandri, G. A., Felix, E. F. ve dos Santos, A. C., 2017, CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study, *Case studies in construction materials*, 6, 147-161.
- Revert, A. B., De Weerd, K., Hornbostel, K. ve Geiker, M. R., 2018, Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset, *Construction and Building Materials*, 162, 847-856.
- Salvoldi, B., Beushausen, H. ve Alexander, M., 2015, Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation, *Construction and Building Materials*, 85, 30-37.
- Sanjuan, M. A., Argiz, C., Gálvez, J. C. ve Moragues, A., 2015, Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance, *Construction and Building Materials*, 96, 55-64.

- Saribas, I. ve Cakir, O., 2017, Short-term Effects of Sodium Sulfate and Sodium Chloride Solutions on The Strength and Durability Properties of Hardened Mortars, *European Journal of Science and Technology*, 6 (10), 38-47.
- Sezer, G. İ., 2012, Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars, *Construction and Building Materials*, 26 (1), 613-618.
- Shannag, M. ve Shaia, H. A., 2003, Sulfate resistance of high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, 25 (3), 363-369.
- Song, H., Chen, J. ve Jiang, J., 2016, An Internal Expansive Stress Model of Concrete under Sulfate Attack, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29 (6), 610-619.
- Subaşı, S. ve Arslan, M., 2008, Kalıp yüzey özelliklerinin betonun karbonatlaşması üzerine etkileri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (4).
- Suleiman, A., Soliman, A. ve Nehdi, M., 2014, Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 73, 674-681.
- Şimşek, O. ve Sancak, E., 2005, Yüksek sıcaklığın silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkıli hafif betona etkileri, *Gazi Üniv, Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 443-450.
- Şimşek, O. ve Baharavar, S., 2014, Karbonatlaşmanın çelik lifli ve uçucu küllü betonlarda etkisi, *Selçuk University Journal of Engineering, Science & Technology/Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2 (1).
- Ta, V.-L., Bonnet, S., Kiese, T. S. ve Ventura, A., 2016, A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures, *Construction and Building Materials*, 129, 172-181.
- Tian, B. ve Cohen, M. D., 2000, Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?, *Cement and Concrete Research*, 30 (1), 117-123.
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., 2008, Silis dumanının betonda mekanik çatlak oluşumlarına etkisi, *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 21, 2.
- TS 3440, 1982, Zararlı kimyasal etkileri olan su, zemin ve gazların etkisinde kalacak betonlar için yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 197-1, 2002, Çimento-Bölüm, 1, 33-42.
- Uwanuakwa, İ. D., 2016, investigations on the prediction of concrete carbonation depth by artificial neural networks, *Near East University, Nicosia*.
- Uygunoğlu, T., Yücel, K. T. ve Yurtçu, Ş., 2006, Betonun zararlı ortamlardaki durumu: Yeraltı suyu etkisi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2 (1), 29-35.
- Wang, W., Lu, C., Li, Y., Yuan, G. ve Li, Q., 2017, Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete, *Construction and Building Materials*, 138, 486-495.

- Yazıcı, H., 1998, Accelerated carbonation test of concrete, *a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of dokuz eylül university*.
- Yazıcıoğlu, S., Demirel, B., Gönen, T. ve Özer, Ş., 2012, Farklı tip çimentoların betonun karbonatlaşmasına etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4 (3), 112-120.
- Yazıcıoğlu, S. ve Kara, C., 2017, Betonda Atık Mermer Tozu Kullanımının Karbonatlaşmaya Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 20 (2), 369-376.
- Zhang, B., Tan, H., Shen, W., Xu, G., Ma, B. ve Ji, X., 2018, Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability, *Cement and Concrete Composites*, 92, 7-17.
- Zhao, G., Li, J. ve Shao, W., 2018, Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 181, 49-58.
- Zhuguo, L. ve Sha, L., 2018, Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 163, 668-680.
- Zhutovsky, S. ve Hooton, R. D., 2017, Accelerated testing of cementitious materials for resistance to physical sulfate attack, *Construction and Building Materials*, 145, 98-106.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nematullah RAHİMİ
Uyruğu : Afganistan
Doğum Yeri ve Tarihi : Bamyan, 30.04.1992
Telefon : (507) 546 75 22
Faks : -
e-mail : nematullah5321@gmail.com

EĞİTİM

| Derece | Adı, İlçe, İl | Bitirme Yılı |
|---------------|--|--------------|
| Lise | : Chajin Waras, Waras, Bamyan | 2009 |
| Üniversite | : Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya | 2016 |
| Yüksek Lisans | : Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya | 2019 |
| Doktora | : | |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|-----|-------|--------|
|-----|-------|--------|

UZMANLIK ALANI

Yapı malzemeleri

YABANCI DİLLER

Türkçe, İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

9-10 Mart, 2019, Ereğli Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi, N. Rahimi, Ü. S. Keskin, E. Yel, M. Saydan “*İnce Taneli Çimento İle Üretilmiş Silis Dumanı ve Mikro Katkılı Betonlara Sülfat Etkisi*” Konya, Türkiye.