



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PORTLAND KLİNKERİ İLE ÜRETİLEN
KALKERLİ ÇİMENTONUN, AYNI DAYANIM
SINIFINA AİT SÜLFAT DAYANIMI YÜKSEK
PUZOLANLI, KATKISIZ VE SR5
ÇİMENTOLARININ YERİNE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Ahmet YİĞİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet YİĞİT tarafından hazırlanan “PORTLAND KLİNKERİ İLE ÜRETİLEN KALKERLİ ÇİMENTONUN, AYNI DAYANIM SINIFINA AİT SÜLFAT DAYANIMI YÜKSEK PUZOLANLI, KATKISIZ VE SR5 ÇİMENTOLARININ YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması 25/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

.....

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

.....

Üye

Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan Kesen
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Koordinatörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 231004004 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 thesis 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.

Ahmet YİĞİT
28.04.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

PORTLAND KLİNKERİ İLE ÜRETİLEN KALKERLİ ÇİMENTONUN, AYNI DAYANIM SINIFINA AİT SÜLFAT DAYANIMI YÜKSEK PUZOLANLI, KATKISIZ VE SR5 ÇİMENTOLARININ YERİNE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet YİĞİT

Konya Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2023, 56 Sayfa

Jüri

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Beton veya betonarme yapılar doğrudan veya dolaylı olarak agresif ortamlara maruz kalmaktadır. Bu agresif ortamların başında sülfat tuzları gelir. Sülfat tuzları ayrıca yeraltı sularında ve bazen de toprakta bulunur. Ayrıca, deniz suyu ile temas eden beton yapılar, asit yağmurları, endüstriyel atıklar da sülfata maruz kalan diğer yapılar sayılabilir. Sürdürülebilirlik açısından betonarme yapıları, beton yapıları tahrip eden hatta çökmelerine neden olan sülfata karşı korumak zorunludur. Bu çalışmada, aynı dayanım sınıfına ait portland klinkeri ile üretilen kalkerli çimentonun, puzolanlı, kompoze, katkısız ve SR5 çimentoların yerine kullanılabilirliğinin araştırması yapılmıştır. Bu çalışmada, magnezyum sülfat çözeltisinin beton basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Harcın olgunlaştırma suyuna ağırlıkça %3 magnezyum sülfat çözeltisi eklenerek kürlenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisine 28. günde maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları kontrol numuneleri ile 1 yıl boyunca karşılaştırılmıştır. Sülfat direncine en yüksek etkiyi sırasıyla C₃A içeriği yüksek olan çimentoların, sonrasında geçirimsizliği düşük olan çimentoların ve en son olarak puzolanik katkı içeren çimentoların gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak ince öğütülmüş ve aynı dayanım sınıfına getirilmiş CEM II A/K çimentonun sülfat dayanımı için tercih edilebilecek bir çimento tipi olduğunu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kalker, magnezyum sülfat, sülfata dayanıklı çimento, tras, puzolan

ABSTRACT

MS. THESIS

INVESTIGATION OF THE USAGE OF PORTLAND LIMESTONE CEMENT INSTEAD OF HIGH SULFATE RESISTANCE CEMENTS IN SAME STRENGTH CLASS WHICH ARE POZZOLANIC, ADDITIVE-FREE AND SR5

Ahmet YİĞİT

Konya Technical University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2023, 56 Pages

Jury

Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Concrete or reinforced concrete structures are directly or indirectly exposed to aggressive environments. At the beginning of these aggressive environments are sulfate salts. Sulfate salts are also found in groundwater and sometimes in soil. In addition, concrete structures in contact with sea water, acid rain, industrial wastes and other structures exposed to sulfate can be counted. In terms of sustainability, it is imperative to protect reinforced concrete structures against sulphate, which destroys concrete structures and even causes them to collapse. In this study, the usability of limestone cement produced with Portland clinker belonging to the same strength class, instead of pozzolanic, composite, additive-free and SR5 cements was investigated. In addition to this in this study, the effect of magnesium sulfate solution on concrete compressive strength was investigated. It was cured by adding 3% by weight magnesium sulfate solution to the curing water of the mortar. The compressive strengths of the samples exposed to the magnesium sulfate solution on the 28th day were compared with the control samples for 1 year. It was determined that cements with high C_3A content, followed by cements with low permeability, and finally cements containing pozzolanic additives showed the highest effect on sulfate resistance. As a result, it has been observed that CEM II A/K cement, which is finely ground and brought to the same strength class, is a cement type that can be preferred for sulfate resistance.

Key words: Limestone, magnesium sulfate, sulfate resistant cement, trass, pozzolan

ÖNSÖZ

Bu tezin her aşamasında beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerini esirgemedi sunan, çalışma motivasyonu ile beni de motivasyonuna dâhil eden çok değerli hocam Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e ve Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Furkan TÜRK hocama en kalbi duygularıyla teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Ayrıca, laboratuvar ve malzeme desteği ile birlikte, tecrübeleriyle de yardım etmekten kaçınmayan Konya Çimento Kalite ve Geliştirme bölümündeki tüm laboratuvar ekibine desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Ahmet YİĞİT
KONYA-2023



İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | ix |
| ÇİZELGELER LİSTESİ..... | xi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER..... | 4 |
| 2.1. Betonda Sülfat Etkisi | 4 |
| 2.2. Sülfatların Betonda Oluşturduğu Zararlı Reaksiyonlar | 13 |
| 2.3. Sülfatların Reaksiyonlarının Gelişimini Etkileyen Parametreler..... | 14 |
| 2.3.1. Ortam şartları ve sülfat muhteleviyatı | 14 |
| 2.3.2. Betonda kullanılan çimento cinsi..... | 15 |
| 2.3.3. Betonun geçirimsizliği | 16 |
| 2.4. Sülfat Saldırısına Karşı Alınacak Önlemler..... | 16 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 19 |
| 3.1. Materyal | 21 |
| 3.2. Yöntem..... | 22 |
| 3.2.1. Çözünmeyen kalıntı | 22 |
| 3.2.2. Serbest kalsiyum oksit (S.CaO) | 23 |
| 3.2.3. Kızdırma kaybı | 23 |
| 3.2.4. Blaine | 23 |
| 3.2.5. 45 µm ve 32 µm elek üzerinde kalan..... | 24 |
| 3.2.6. Basınç dayanımı..... | 24 |
| 3.2.7. Kıvam suyu tayini..... | 26 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI..... | 28 |
| 4.1. Üretilen Çimentoların, Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri Ve Dayanımlarının Takibi | 28 |
| 4.2. Üretilen Çimentoların Sülfat Saldırısı Sonucu Basınç Dayanım Testleri..... | 30 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 37 |
| KAYNAKLAR | 40 |

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 |
| MgSO ₄ | : Magnezyum sülfat |
| Na ₂ SO ₄ | : Sodyum sülfat |
| S/Ç | : Su/çimento oranı |
| K | : Ekipman sabiti |
| P | : Çimentonun yoğunluğu |
| η | : Deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi |
| t | : Süre |

Kısaltmalar

| | |
|-------|--|
| ACI | : American Concrete Institute |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials |
| CH | : Kalsiyum Hidroksit |
| C-S-H | : Hidrate Kalsiyum Silikat Jeli |
| TS | : Türk Standartları |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Sülfatlı nehir suyunun uzun süreli betona etkisi..... | 1 |
| Şekil 1.2. Sülfatın beton üzerinde çalışma mekanizması..... | 2 |
| Şekil 1.3. Sülfatın beton üzerinde bozulma etkisi | 2 |
| Şekil 1.4. Sülfat etkisinde oluşan etrenjitin mikroskobik yapısı..... | 3 |
| Şekil 2.1. Kürlenme zamanı dayanım kıyaslaması ((E. A. El-Alfi ve ark. 2003)..... | 8 |
| Şekil 2.2. Farklı ikame seviyelerinde silis dumanı ve/veya kireçtaşı içeren harçların basınç dayanımı (G. İnan 2011) | 9 |
| Şekil 2.3. 150 günde S/cC= 0,5 ile %5 Na ₂ SO ₄ çözeltisindeki kübik macunların yüzey hasarı. (Lingling Hu ve ark. 2020) | 10 |
| Şekil 2.4. Harç örnekleri için karışım tasarımı. (Çimento türleri EN197-1'e göre ticari olarak mevcuttur) (Florian Mittermayr ve ark. 2014) | 11 |
| Şekil 2.5. 8 C'de 30 g/ l Na ₂ SO ₄ çözeltisine 200 gün daldırıldıktan sonra harç prizmaları; Hasar seviyeleri: (0) görünür hasar yok, (Mi) küçük hasar, (Ma) büyük hasar, (D) dağıldı. (Florian Mittermayr ve ark. 2014) | 11 |
| Şekil 2.6. %1,8'lik MgSO ₄ çözeltisi içerisinde 5 °C sıcaklıklarda 3 yıl bekletilen beton numunelerinin hasar durumu (A. Scarapoulou ve ark. 2012)..... | 12 |
| Şekil 2.7. Kalkerli ve Killi agrega kullanılarak hazırlanan ve %1,8'lik MgSO ₄ çözeltisi içerisinde 5 °C ve 25 °C sıcaklıklarda 3 yıl bekletilen beton numunelerinin dayanımları (A. Scarapoulou ve ark. 2012)..... | 12 |
| Şekil 3.1. Otomatik Blaine cihazı | 24 |
| Şekil 3.2. Alphin elek cihazı ve elekler | 25 |
| Şekil 3.3. (a) harç karıştırma makinesi ve karıştırma kabı, (b) üç gözlü çelik beton kalıbı, (c) sarsma cihazı | 25 |
| Şekil 3.4. Manuel vicat cihazı ve vicat kalıbı | 26 |
| Şekil 4.1. Deneyde kullanılan çimentolar ile hazırlanan harç karışımların 2.-7. ve 28. gün basınç dayanımı sonuçları | 29 |
| Şekil 4.2. Deneyde kullanılan çimentolar ile hazırlanan harç karışımların basınç dayanım sonuçları | 31 |
| Şekil 4.3. CEM II/A Harç Dayanım Sonuçları | 32 |
| Şekil 4.4. CEM I Harç Dayanım Sonuçları | 33 |
| Şekil 4.5. CEM I -SR5 Harç Dayanım Sonuçları | 33 |
| Şekil 4.6. CEM II/A K Harç Dayanım Sonuçları | 34 |
| Şekil 4.7. CEM II/A T Harç Dayanım Sonuçları | 34 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.8. 360. Gün Sonunda Çözelti İçindeki Harçların Referansa Göre % Dayanım Kaybı..... | 35 |
| Şekil 4.9. % C ₃ A İçeriği ,Blaine Değerleri ve % Dayanım Kaybı Kıyaslaması Grafiği..... | 36 |



ÇİZELGELER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 2.1. TS EN 206’da betonun zararlı kimyasal etki durumuna göre sınır değerler | 17 |
| Çizelge 3.1. Üretilen çimentolarda katkı olarak kullanılan kalker ve tras analizleri..... | 19 |
| Çizelge 3.2. Üretilen çimentoların katkı miktarlar..... | 20 |
| Çizelge 3.3. Üretilen çimentoların 28 günlük dayanım değerleri | 20 |
| Çizelge 3.4. Magnezyum sülfat çözeltilisinde kullanılan kalıp numune adet tablosu | 20 |
| Çizelge 3.5. Normal Kür Havuzunda kullanılan kalıp numune adet tablosu | 21 |
| Çizelge 3.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan hammadde ve kimyasallar | 21 |
| Çizelge 3.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz/ekipmanlar..... | 22 |
| Çizelge 4.1. Üretilen çimentoların kimyasal içerikleri | 28 |
| Çizelge 4.2. Üretilen çimentoların fiziksel özellikleri | 28 |
| Çizelge 4.3. Karakteristik değerler olarak verilen mekanik ve fiziksel gerekler (TS EN 197-1) | 29 |
| Çizelge 4.4. Harçların Basınç Dayanım Değerleri (Mpa) | 30 |
| Çizelge 4.5. Çimento tiplerine göre dayanım kaybı yüzdeleri | 35 |

1. GİRİŞ

Beton, ilk kullanıldığı günden bu yana en çok tercih edilen yapı malzemelerinden biridir. Betonun yaygın olarak kullanılmasının nedenleri arasında ekonomik olması, dayanıklılığı, hemen hemen her yerde üretilebilmesi ve şekillendirilebilmesi kolaylığı yer almaktadır. Binalar, sığınaklar, köprüler, yollar, tüneller gibi yaşam koşullarımızı kolaylaştıran ve insanların barındığı yapıların büyük bir kısmı betondan yapılmıştır.

Betonun yapısında zamanla değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişiklikler hava koşulları, sülfatlı, tuzlu ve asidik sular veya bazı kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar gibi birçok faktörden kaynaklanabilir. Bu olaylar zaman içinde betonun dayanıklılığını azaltabilir ve hizmet ömrünü kısaltabilir (Zhang vd., 2018).

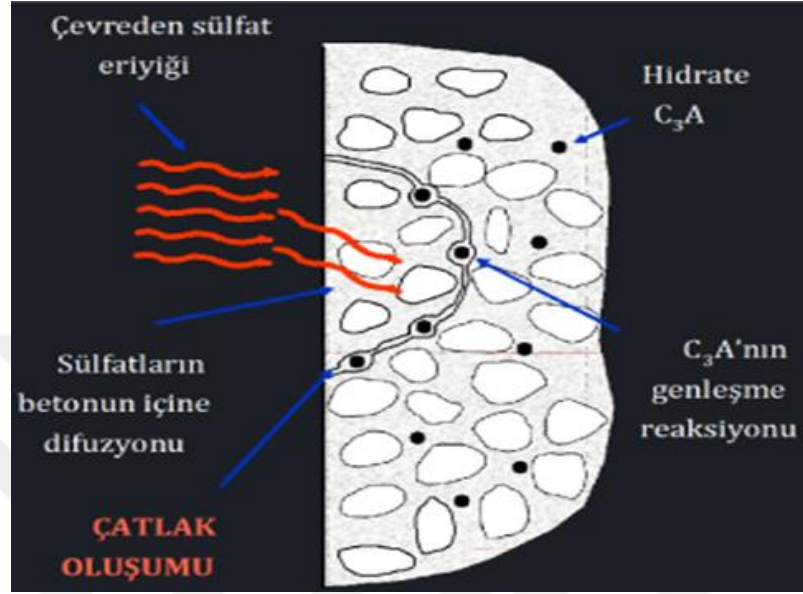
Beton bozulmalarının en önemli nedenlerinden biri zararlı kimyasallar içeren yeraltı suları, toprak ve deniz suyudur. Şekil 1.1'de, sülfatlı nehir suyunun uzun süreli etkilerinin betonda yarattığı hasar görülebilir.



Şekil 1.1. Sülfatlı nehir suyunun uzun süreli betona etkisi (Ö.Yeniay 2022)

Yeraltı suları ve topraklarda bulunan agresif kimyasallar arasında sülfat iyonlarının, beton yapıların dayanıklılığı üzerinde en fazla etkiye sahip olanlar olduğu bilinmektedir (Zhao ve ark., 2018). Yeraltı suları ve bazı kil topraklarda yüksek seviyelerde sülfat iyonları bulunur. Sülfata maruz kalan betonlar genellikle temel betonları, kanal kaplama betonları, istinat duvarı betonları, deniz iskele betonları ve beton borulardır. Bu iyonlar, sodyum sülfat, magnezyum sülfat, kalsiyum sülfat ve potasyum sülfat formunda bulunur ve beton boşluklarına sızarak beton içinde genişlemeye neden olur. Bu genişleme, çimentonun betondaki bağlayıcı değerini

azaltarak betonun aşınmasına yol açar. Sülfat saldırısı, betonun genişlemesi ve çatlaması şeklinde ortaya çıkabilir. Başlangıçta önemsiz görünen çatlaklar, zamanla geçirgenliğin artması ve agresif suların daha kolay şekilde betona ulaşması nedeniyle betonun bozulmasını hızlandırabilir. Şekil 1.2'de sülfatın beton üzerindeki etki mekanizması gösterilmektedir.



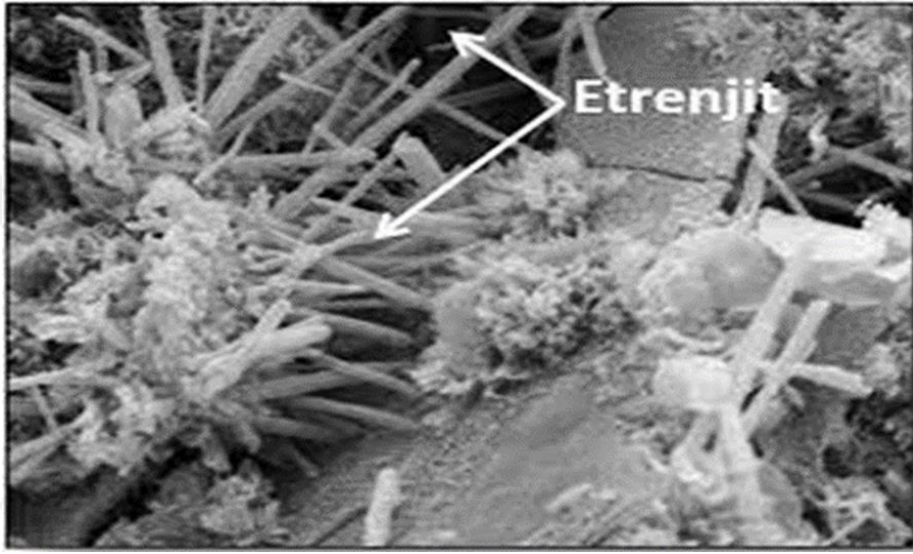
Şekil 1.2. Sülfatın beton üzerinde çalışma mekanizması (Akalin T. 2010)

Sülfatlar, betonu olumsuz etkileyen en önemli faktördür. Sülfat saldırısına maruz kalan betonlar, sülfat ve çimento bileşikleri arasındaki reaksiyon sonucunda zamanla bozulma gösterirler. Şekil 1.3'te, sülfatın beton üzerindeki bozulma etkisi açıkça görülebilir.



Şekil 1.3. Sülfatın beton üzerinde bozulma etkisi (Akalin T. 2010)

Sülfatın etkisiyle oluşan etrenjit, jips ve tomazit gibi ürünler betonun hacmini değiştirir. Bu değişiklikler sonucu beton genişir, dağılır ve parçalanır. Sülfat saldırısı sonucunda betonda oluşan genişleme, alkali ortamda suyu tutan etrenjit ve yapıda basınç uygulamasına neden olan genişleme ile alçının matrisin pH'ını düşürmesi sonucu oluşan rijitlik kaybı ve alçının genişlemesi ile ilişkilendirilir (Mehta ve Monteiro, 2006). Betona sülfat maruz kaldığında yüzeyinde beyaz lekeler oluşur ve bu etki köşelerde ve daha hassas noktalarda başlayarak tüm kütleye yayılır (Göktepe, 2008). Şekil 1.4'te, sülfat etkisine bağlı olarak oluşan etrenjitin mikroskobik yapısı görülebilir.



Şekil 1.4. Sülfat etkisinde oluşan etrenjitin mikroskobik yapısı (Akalin T. 2010)

Sülfat saldırısına karşı betonda alınabilecek önlemler arasında, beton geçirgenliğinin azaltılması, çimento bileşimindeki C_3A ve $Ca(OH)_2$ miktarının sınırlandırılması, sülfata dayanıklı katkı maddelerinin kullanılması ve betonun sülfata karşı dayanıklı bir kaplama ile kaplanması yer alır.

Sülfat saldırısını engellemek için öncelikle betonun geçirimsiz hale getirilmesi gereklidir. Betonun karbonatlaşma duyarlılığının azaltılması, sülfat kristalleşme sorununu önceden önleyebilir ve betonun hasarını yavaşlatabilir (Liu ve diğ., 2018). Betonun geçirgen olması, zemindeki sülfatlara kolayca nüfuz etmesine neden olabilir. Bu nedenle, betonun geçirgenliğinin azaltılması, betona nüfuz edecek sülfat miktarını azaltarak sülfat saldırısını önleyebilir.

Bu çalışmanın amacı, aynı dayanım sınıfına ait portland klinkeri ile üretilen kalkerli, puzolanlı ve katkısız çimentoların sülfat dayanımının karşılaştırılmasıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE GENEL BİLGİLER

Betonun dayanıklılığını ve dayanımını etkileyen pek çok etken mevcuttur. Ancak bu etkenler arasında en önemlilerinden biri sülfatların etkisidir. Sülfat ortamlarında bulunan betonlar, sülfat ve çimento bileşimleri arasındaki reaksiyonlar sonucunda zamanla bozulma gösterirler. Böylece betonun genişerek çatlaması ve dağılması kaçınılmaz hale gelir. Bu nedenle, betonun dayanımı ve dayanıklılığı önemli ölçüde azalır.

2.1. Betonda Sülfat Etkisi

Beton, çevresel etkilere karşı oldukça hassastır. Özellikle, dış etkenlerdeki çeşitli iyonlar, beton bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun hacimsel stabilitesini bozmaktadır. Bu iyonlar arasında en büyük zararı sülfat tuzları vermektedir. Sülfatlar, betona ciddi hasarlar vererek, betonun dayanıklılığını azaltır. Sodyum, magnezyum, kalsiyum, potasyum ve amonyum gibi katyonlar, betona zarar veren başlıca sülfat tuzlarıdır (Şahin ve ark., 2022).

Betonun dayanıklılığını etkileyen önemli bir konu olan sülfat saldırısı, istemeden ortaya çıkan bir kimyasal saldırıdır. Beton hasarına neden olan sülfatlar için genel anlamda iki mekanizmadan kaynaklandığı söylenebilir. Bu mekanizmalar kimyasal sülfat saldırısı ve fiziksel sülfat saldırısıdır. Sülfat saldırısı olarak bilinen olay, betona zarar veren zararlı ürünlerin fiziksel kristal büyümesinin yanı sıra etrenjit, alçı ve tomasit gibi ürünlerin oluşumuna neden olan kimyasal reaksiyonlar yoluyla gerçekleşir. Başka bir deyişle, bu olay sülfat tuzları ile çimento mineralleri arasındaki kimyasal etkileşim sonucu meydana gelir (Zhutovsky ve Hooton, 2017). Sülfat kristalizasyonu ya da fiziksel sülfat atağı, betonun gözeneklerinde sülfatın kristalleşmesiyle oluşur (Liu ve ark., 2018). Betondaki gözenek çözeltisi ile sülfat iyonları arasındaki reaksiyon, kalsiyum-sülfo-alüminat adı verilen bir bileşiğin oluşmasına neden olur. Ancak, bu bileşik gecikmeli etrenjit olarak da bilinen bir olumsuzluk yaratabilir. Gecikmiş etrenjit, bileşiğin kristallerinin büyümesine ve yoğun gerilimlere neden olarak, mikro çatlakların oluşmasına ve büyümesine yol açabilir. Bu durum, beton yapıların dayanıklılığını azaltabilir. Song ve arkadaşlarının (2016) çalışması da bu olumsuzluğu doğrulamaktadır. Sülfat konsantrasyonu düşük olsa bile, etrenjit oluşumu gerçekleşebilir. Bunun nedeni, etrenjit oluşumunun sadece sülfat iyonlarına değil, aynı zamanda kalsiyum alüminat hidrat fazlarının çözünürlüğüne de bağlı olmasıdır. Ayrıca,

etrenjit oluşumu, ortam sıcaklığındaki değişikliklere de duyarlıdır. Zhao ve arkadaşlarının (2018) yaptığı çalışma da, etrenjit oluşumunun bu faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Beton, deniz suyu veya yeraltı suyu gibi sularda bulunan tuzlarla temas ettiğinde, sülfat atağına maruz kalabilir. Bu durumda, betonun içerdiği kalsiyum hidroksit, Na_2SO_4 , MgSO_4 ve K_2SO_4 gibi tuzlarla reaksiyona girerek, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ adı verilen jips bileşiğinin oluşmasına neden olur. Alişer ve arkadaşlarının (2016) yaptığı çalışma, bu süreci doğrulamaktadır. Doğal alçı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tabakaları, yüksek sülfat konsantrasyonlarına sahip olabilir. Bu durum, betonun maruz kaldığı etrenjit oluşumuna benzer bir genişmeye neden olabilir. Alişer ve arkadaşlarının (2016) çalışması, doğal alçı tabakalarındaki sülfat konsantrasyonunun etrenjit oluşumuna neden olduğunu doğrulamaktadır. Hem alçı hem de etrenjit oluşumu, reaktant hacminde yaklaşık 1,2-2,3 kat artışa neden olabilir. Bu da, betonun genişmesine ve çatlmasına neden olabilir. Najjar ve arkadaşlarının (2017) çalışması, bu durumu desteklemektedir. Alçı oluşumunun betonun genişlemesine yol açıp açmadığı konusu tartışmalıdır. Tian ve Cohen'in (2000) yaptığı literatür taraması ve laboratuvar çalışmaları, sülfat atağı sırasında alçı oluşumunun genişlemeye neden olabileceğini göstermiştir. Ancak bu teori, başka araştırmacılar tarafından da çelişkilidir ve henüz kesinleşmemiştir.

Sülfat etkisine maruz kalan betonun dayanımı azalır ve özellikle köşeler, kenarlar gibi daha hassas noktalarda karakteristik görünümü bozulmaya başlar. Bu durum, beton yüzeyinde beyaz noktalar, kabarmalar ve çatlaklar gibi deformasyonlara neden olabilir (Göktepe, 2008). Katı ve kuru tuzların betona etkisi yoktur ancak su varlığında sertleşmiş çimento harcı ile bazı kimyasal reaksiyonlar yaparak beton üzerinde olumsuz etki yaparlar. Zemin yüzeyinde ve topraklarda oluşan bu katı ve kuru tuzlar genellikle sodyum sülfat ve magnezyum sülfattır. Magnezyum ve sodyum sülfat tuzları, sızan su ile birlikte betona nüfuz ederek genişleme oluşturarak betondaki bağlayıcı değeri azaltır (Kuyumcu, 2006).

Sülfat saldırısı, betona zarar verebilecek birçok faktöre bağlıdır ve toprak veya yeraltı suyu gibi dış faktörler bu saldırının nedenlerinden biridir. Bu nedenle, yapılacak işler için zemin etüdü yanında topraktan ve yeraltı suyundan numuneler alınarak, betona zarar verebilecek herhangi bir madde olup olmadığı incelenmelidir.

Kılıç (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı sülfat tuzları içeren çözeltiler (%2, %4, %6 magnezyum sülfat; %0,5, %1, %2, %3 sodyum sülfat; %0,005, %0,01, %0,02, %0,03 sodyum sülfür) hazırlanmıştır. Bu çözeltiler kullanılarak

numuneler oluşturulmuş ve betonun birim ağırlık, ultrasonik hız, eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, en zararlı etkinin magnezyum sülfatta, daha az zararlı etkinin sodyum sülfatta olduğunu göstermiştir. Sodyum sülfür ile yapılan çalışmada, betonun basınç dayanımında hafif bir artış gözlemlenmiştir. Çözeltiler, harçların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlerinde önemli bir değişiklik oluşturmamıştır (%2-3 civarında değişim). Sodyum sülfat etkisindeki betonlarda magnezyum sülfat etkisindekilere göre daha az eğilme mukavemeti görülmüştür. Magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve sodyum sülfür içeren çözeltilerde bekletilen betonların ultrasonik hız değerleri değişmemiş, magnezyum sülfat ve sodyum sülfat etkisindeki betonların çekme değerleri artmış ve sodyum sülfür etkisindeki betonların çekme değerleri azalmıştır.

Dikme (2010) çalışmasında, sülfat saldırısına karşı davranışları araştırmak için dört farklı mineral katkılu uçucu kül, yüksek fırın cürufu, nano-silika ve mikro-silika katkı maddeleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, mineral katkıların özellikle yüksek fırın cürufu kullanımıyla birlikte betonun iç ve dış sülfat etkisinden kaynaklanan deformasyonları önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir (Dikme, 2010).

Arslan (2014) tarafından yapılan çalışmada, sülfat etkisine maruz kalan mineral katkılu harçların dayanıklılığı incelenmiştir. Mikro silika, nano silika, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanılmıştır. Araştırmada, Sakarya kumu kullanılarak sülfat içeriği düşük harç numuneleri hazırlanmış ve farklı oranlarda mineral katkı ve katkısız referans numuneler %5 sodyum sülfat içeren solüsyonda tutulmuştur. Irak kumu kullanılarak üretilen mineral katkılu numuneler ise su küründe bekletilerek dış ve iç sülfat etkilerine maruz bırakılmıştır. Numunelerin üzerinde çeşitli deneyler yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Araştırmanın sonucuna göre, mineral katkıların oranlarına bağlı olarak sülfat etkisi altında uzama önemli ölçüde azaltılmıştır. Mikro silika katkısı, mineral katkıları arasında en fazla faydayı sağlamıştır. Mineral katkı kullanılmayan numunelerde ise dış sülfat etkisi nedeniyle zamanla ciddi hasarlar ve dökülmeler gözlemlenmiştir. Dış sülfat etkisine maruz kalan numunelerde basınç dayanımında %38, eğilme dayanımında ise %66 oranında kayıp meydana gelmiştir (Arslan, 2014).

Ilıca'nın (2008) çalışması, deniz suyu ortamında kullanılan farklı tipteki çimentolarla hazırlanan betonların dayanıklılığını incelemiştir. Çalışmada, C25, C30, C35 ve C40 mukavemet sınıflarında numuneler kullanılmış ve bu numunelerin ağırlık değişimi, boy değişimi ve ultrason hızı belirleme deneyleri yapılmıştır. Test sonuçlarına

göre, en yüksek ağırlık kaybı, boy değişimi ve ultrason hız kaybı CEM III 42,5 N-C25 numunelerinde gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, SDÇ numunelerinin sülfat direnci, cüruf çimentolara göre beklenenden daha yüksek olmayarak tespit edilmiştir (İlca, 2008).

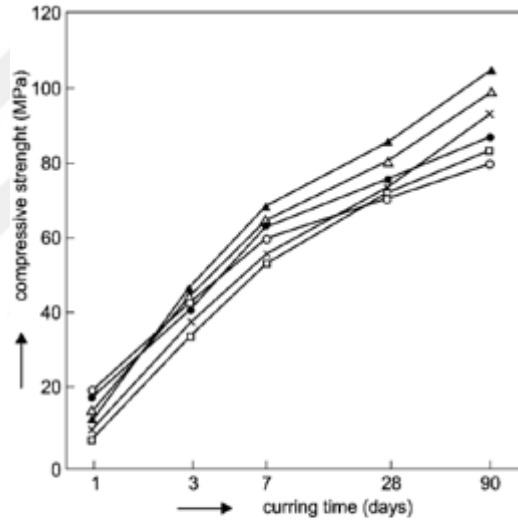
Kardeşler (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beton karışım suyu olarak magnezyum sülfat çözeltilerinin uçucu kül betonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde, Portland çimentosu (CEM I 42,5 R), farklı magnezyum sülfat çözeltileri (%2, %4, %6 ve %8) ve uçucu kül oranları (%10, %25 ve %37,5) kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, magnezyum sülfatın priz başlangıç ve bitiş zamanlarını geciktirdiği, uçucu kül içeriğinin artmasıyla bu etkinin daha da arttığı gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat oranının artmasıyla mukavemet değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak, uçucu kül oranının artmasıyla magnezyum sülfatın zararlı etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, magnezyum sülfatın su emme ve büzülme miktarını arttırdığı, uçucu külün ise bu miktarları azalttığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, Kardeşler (2005) çalışmasında, magnezyum sülfat çözeltilerinin uçucu kül betonu üzerindeki etkileri incelenmiş ve uçucu kül kullanımının sülfata dayanıklılığı artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Sergii Kroviakov ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Puzolan katkılı Portland çimentosu içeren betonlar ve sülfata dayanıklı Portland çimentosu içeren betonlar, Na_2SO_4 çözeltisine sahip sıvı sülfat ortamında yaklaşık olarak aynı seviyede stabilite sergilemiştir. 6 aylık numune maruziyeti sonucunda, aynı anda donma ve çözülme ile agresif sıvı sülfat ortamıyla temas halinde kullanılan betonlarda sülfata dayanıklı Portland çimentosuna alternatif olarak puzolan katkılı Portland çimentosunun kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır (Sergii Kroviakov ve ark. 2019).

Rodriguez-Camacho ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada, farklı doğal puzolan içeren çimentoların sonuçlarını ASTM Tip I, II ve V çimentoları ile karşılaştırmıştır. Her bir puzolanın puzolanik aktivitesi ve bileşimi değerlendirilmiş ve sülfat saldırısına duyarlılık, 78 hafta boyunca farklı yaşlarda (ASTM C 1012 Metodu'na göre) harç çubuklarındaki genişleme ölçülerek incelenmiştir. Yüksek aktiviteli veya düşük alümina içerikli puzolan içeren bazı çimentoların, çimentodaki puzolan miktarı önemli olmasına rağmen sülfat saldırısına karşı direnci arttırdığı sonucuna varılmıştır (Rodriguez-Camacho ve ark. 2002).

E. A. El-Alfi ve ark. (2003) çalışmalarında, kireçtaşı ve silis dumanı içeren 90 güne kadar kürlenmiş sülfata dayanıklı çimento pastalarının özelliklerini incelemiştir.

Çimentoya ağırlıkça %5 kireçtaşı ve silis dumanının eklenmesinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve 3-90 günlük kür sürelerinde daha düşük gözeneklilik sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %8 ve %10 silis dumanı içeren pastalarda serbest kireç içeriklerinin düştüğü (ağırlıkça %2.4 ve %0.91) görülmüştür (E. A. El-Alfi ve ark. 2003). Bu araştırmadan elde edilen başlıca sonuçlar özetlenecek olursa; sülfat dayanımlı çimentoya ağırlıkça %10 kireç taşı ilavesi hidrasyon oranını 3 günden 90 güne kadar yükselttiği, çimento hamurlarına ağırlıkça %10 oranında silis dumanı ilavesi, serbest kalan serbest Ca(OH)_2 'yi minimum bir değere (ağırlıkça %1,4) düşürdüğü, silis dumanı ağırlıkça %5'e kadar arttığında sertleşme oranının diğer numunelere göre daha yüksek bir değere ulaştığı, çimento hamuruna ağırlıkça %5 kireçtaşı ve silis dumanı ilavesi, tüm kürleşme dönemlerinde en düşük gözenekliliğin yanı sıra iyi mekanik özellik gösterdiği tespit edilmiştir (E. A. El-Alfi ve ark. 2003).



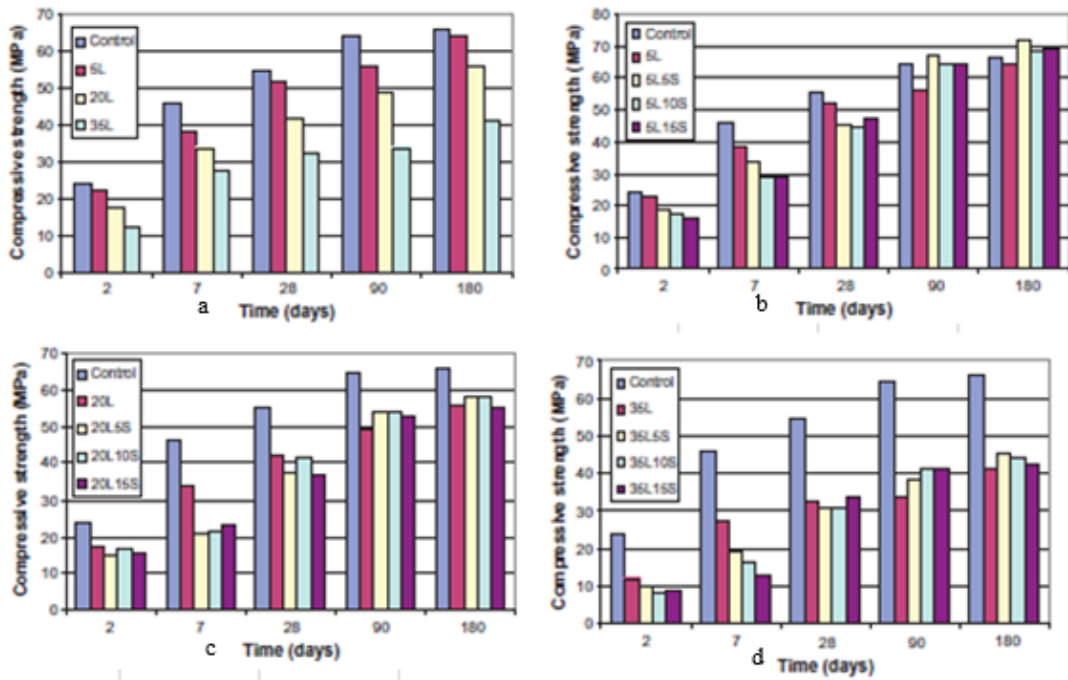
Compressive strength of cement pastes against curing time (○ - M₁; ● - M₂; △ - M₃; ▲ - M₄; × - M₅; □ - M₆).

| Mix No. | SRC | Limestone | Silica fume |
|----------------|-----|-----------|-------------|
| M ₁ | 100 | 0 | 0 |
| M ₂ | 90 | 10 | 0 |
| M ₃ | 90 | 7.5 | 2.5 |
| M ₄ | 90 | 5.0 | 5.0 |
| M ₅ | 90 | 2.5 | 7.5 |
| M ₆ | 90 | 0 | 10 |

Şekil 2.1. Kürleşme zamanı dayanım kıyaslaması ((E. A. El-Alfi ve ark. 2003)

G. İnan (2011) yaptığı çalışmada, farklı ikame seviyelerinde silis dumanı ve/veya kireçtaşı içeren harçların basınç dayanımı ve sülfat dayanımı incelemiştir. Bu amaçla çimento ağırlığına göre %5, %20, %35 oranında kalker ve %5, %10, %15 oranında silis dumanı kullanmıştır. Farklı oranlarda kireçtaşı ve/veya silis dumanı içeren 16 farklı katkılı çimento hazırlanmış ve bu 16 çimentoyu kullanarak harç karışımları hazırlanmıştır. Harç karışımlarının akma değerleri ve 2, 7, 28, 90, 180 günlük basınç

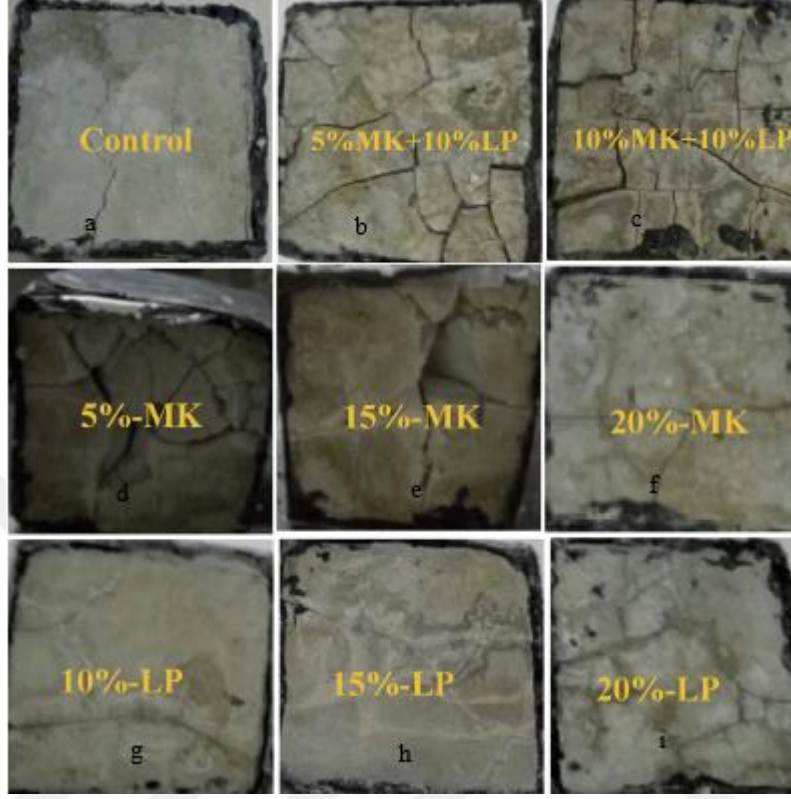
dayanımlarını ve harçların sülfat dayanımlarını sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinde ayrı ayrı belirlemiştir. Yaptığı çalışmalar sonucunda silis dumanının harçların işlenebilirliğine, kireçtaşının ise harçların basınç dayanımına olumsuz etkisinin kireçtaşı ve silis dumanının birlikte kullanılmasıyla telafi edilebileceğini gözlemlemiştir. Ayrıca kalker ve silis dumanının eş zamanlı kullanımının harçların sülfat direncini arttırdığını gözlemlemiştir (G İnan 2011). Şekil 2.2.'de çalışmada tespit edilen farklı ikame seviyelerinde silis dumanı ve/veya kireçtaşı içeren harçların basınç dayanım sonuçlarını paylaşmıştır.



Şekil 2.2. Farklı ikame seviyelerinde silis dumanı ve/veya kireçtaşı içeren harçların basınç dayanımı (a)kalkerli karışım, (b) düşük oranda kalker ve silis dumanlı karışım, (c) kalker ve silis dumanlı karışım ,(d) yüksek oranda kalker ve silis dumanlı karışım(G. İnan 2011)

Lingling Hu ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, X-ışını kırınımı (XRD), termogravimetrik analiz (TG/DTG) teknikleri ile çimento esaslı malzemelere metakaolin ve kireçtaşı tozu ilavesi ile sülfat direncine olan etkisini araştırmışlardır. Harçların basınç dayanımını artırmak için %10'luk metakaolinin optimum olduğunu tespit etmişlerdir. Kireçtaşı tozu, sülfat saldırısının bir dereceye kadar bastırılması için termostabil ürün monokarboalüminatın oluşumunu teşvik etmek için belirli kimyasal reaktivite göstermiş fakat metakaolin ve kireçtaşı tozu hibritleri, %5-10'luk yetersiz metakaolin dozları nedeniyle negatif bir sülfat direnci göstermiştir. Bu çalışma, çimento

esaslı malzemelerin sülfat direncini artırmak için metakaolin ve kireçtaşı tozu kullanımına yapıcı bir bakış açısı sağlamıştır (Lingling Hu ve ark. 2020).



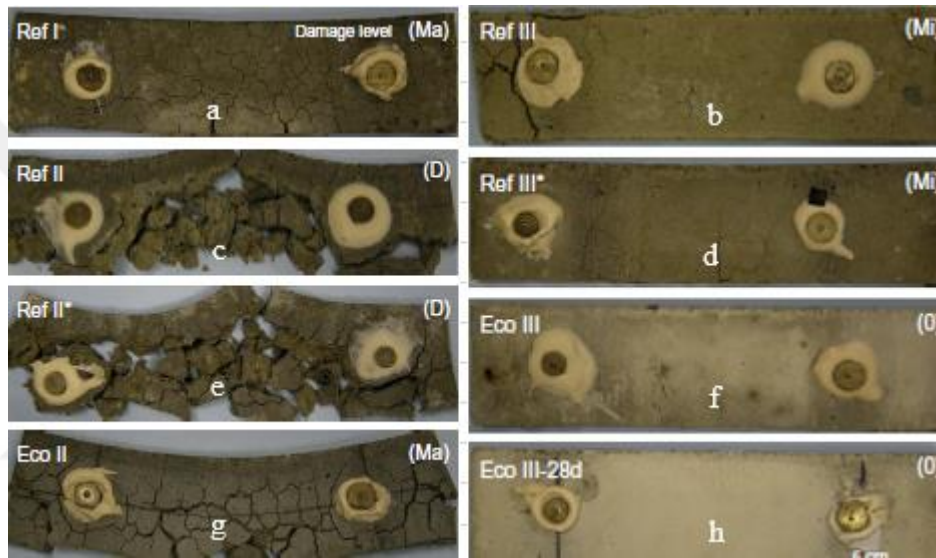
Şekil 2.3. 150 günde S/cC= 0,5 ile %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki kübik macunların yüzey hasarı. (a) Kontrol numunesi (b) %5 Metakaolen+%10 Kireçtaşı,(c) %10 Metakaolen+%10 Kireçtaşı,(d) %5 Metakaolen, (e) %15 Metakaolen, (f) %20 Metakaolen, (g) %10 Kireçtaşı, (h)%15 Kireçtaşı, (i) %5 %20 Kireçtaşı (Lingling Hu ve ark. 2020)

Florian Mittermayr ve ark. (2014) çalışmalarında, yeni geliştirilen, yüksek kireçtaşı tozu içeriğine ve düşük su/çimento oranına sahip, çimento katkıli çevre dostu iki betonun sülfat dayanımı test etmişlerdir. Ekolojik hamur bileşimine sahip harç numuneleri ile konvansiyonel betonlar 30 g/l Na₂SO₄ ve doymuş Ca(OH)₂ referans çözeltilerine 200 gün 8 °C de daldırılmıştır. İlerleyen sülfat saldırısının reaksiyon mekanizmalarını değerlendirmek için mekanik, mineralojik ve mikroyapısal yöntemlerin birleşik bir yaklaşımı uygulanmıştır. Potansiyel olarak elverişli koşullara rağmen tomasit Ca₃Si(OH)₆(CO₃)(SO₄)·12H₂O oluşumu gözlenmemiştir. Her iki çevre dostu karışım da karşılık gelen referans numunelerinden daha iyi bir sülfat direnci sergilemiş ve bu nedenle DIN EN 206-1'e göre düşük sülfat yüklü ortamlarda uygulanabilir olmaları önerilmiştir. CEM III/B bazlı çevre dostu beton, sülfat saldırısına karşı üstün performans göstermiştir ve standardın gerektirdiğinden çok daha yüksek

su/çimento oranına rağmen şiddetli sülfat maruziyetine bile dayanması beklendiği öngörülmüştür (Florian Mittermayr ve ark. 2014).

| Mix ID | | Ref I | Ref II | Ref III | Ref II* | Eco II | Ref III* | Eco III |
|--------------|----------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|---------|
| Water/cement | | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 1.07 | 0.74 | 0.76 | 0.61 |
| Water/powder | | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.36 | 0.60 | 0.35 |
| Cement | Type | CEM I 32.5R | CEM II/A-S 52.5 N | CEM III/B 42.5 N | CEM II/A-S 52.5 N | CEM III/B 42.5 N | CEM III/B 42.5 N | |
| | Clinker ^a | [g] 450 | 405 | 135 | 262 | 293 | 102 | 112 |
| | Slag | [g] - | 45 | 315 | 28 | 32 | 252 | 286 |
| | Total | [g] 450 | 450 | 450 | 290 | 325 | 354 | 398 |
| Fly ash | [g] | - | - | - | 80 | 90 | 48 | 55 |
| Limestone | [g] | - | - | - | 80 | 256 | 48 | 236 |
| Total powder | [g] | 450 | 450 | 450 | 450 | 671 | 450 | 689 |
| Water | [g] | 270 | 270 | 270 | 270 | 233 | 270 | 241 |
| PCE-SP | [g] | - | - | - | - | 2.9 | - | 1.6 |
| Sand 0-2 mm | [g] | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 | 1350 |

Şekil 2.4. Harç örnekleri için karışım tasarımı. (Çimento türleri EN197-1'e göre ticari olarak mevcuttur) (Florian Mittermayr ve ark. 2014)

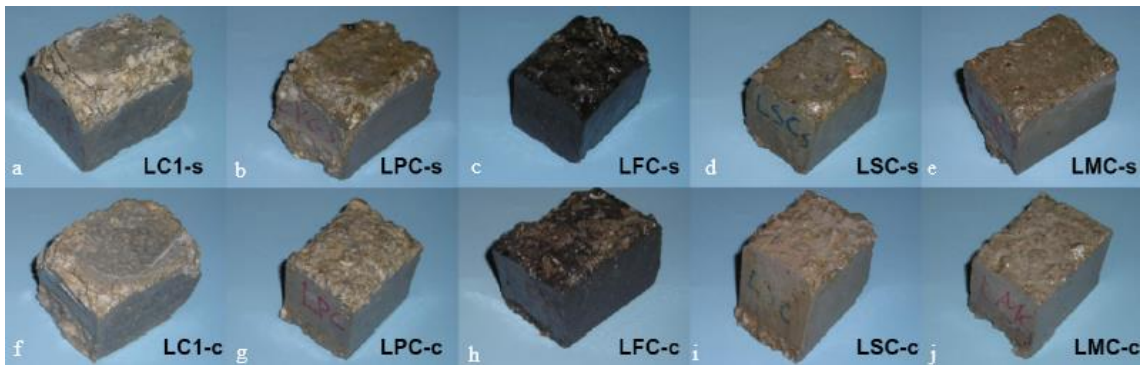


Şekil 2.5. 8 C'de 30 g/l Na₂SO₄ çözeltisine 200 gün daldırıldıktan sonra harç prizmaları; Hasar seviyeleri: (O) (f), (h) görünür hasar yok, (Mi) (b),(d) küçük hasar, (Ma) (a),(g) büyük hasar, (D) (c),(e) dağıldı. (Florian Mittermayr ve ark. 2014)

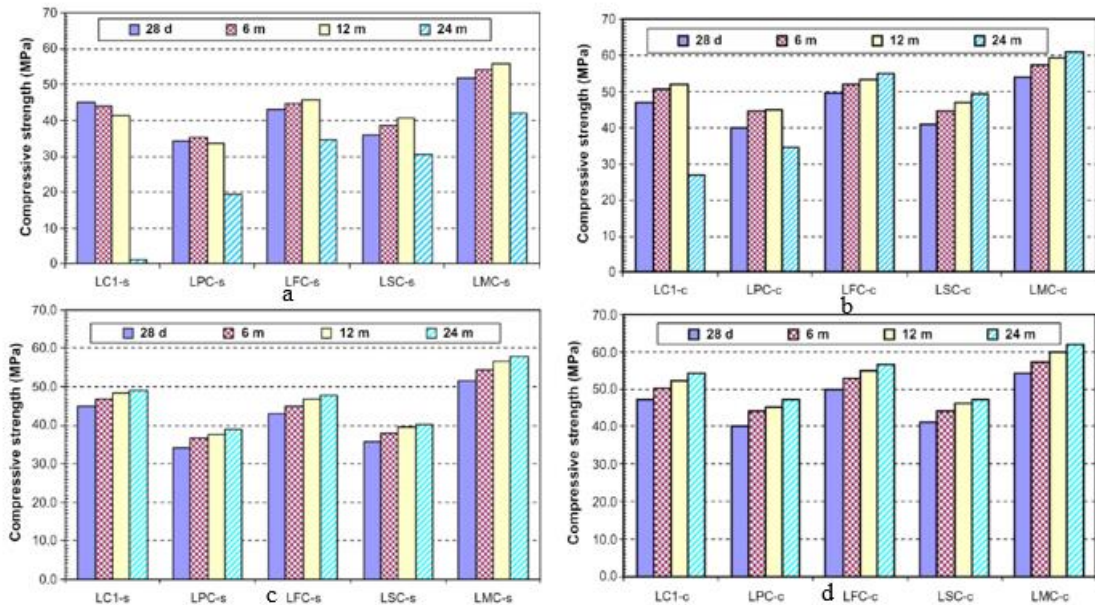
Florian ve ark. Çalışmalarında, DIN 1045-2/EN 206'ye göre yüksek kireçtaşı tozu içeriğine sahip ancak düşük su ($s/c < 0.35$) içeriğine sahip çevre dostu betonların düşük sülfat konsantrasyonlarına (XA1) sahip ortamlarda uygulamaya uygun olduğu, orta derecede sülfat yüklü ortamlarda (XA2) düşük su oranı ($s/c < 0.35$) ile yüksek fırın cürufu esaslı kireçtaşı bakımından zengin harçların uygulanmasının mümkün olduğu ve bu betonların ağır koşullar altında bile yeterli dayanıklılığa sahip olduğu sonucuna varmışlardır (Florian Mittermayr ve ark. 2014).

A.Scarapoulou ve ark. (2012), kalkerli çimento kullanılarak yapılan betonlarda mineral katkı kullanımının sülfat atağı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca,

depolama sıcaklığının etkisinin yanında kullanılan kilin ve kalkerin türlerinin etkisi incelenmiştir. Kalkerli çimentoda %15 kalker katkılı çimento kullanılmış, beton numuneleri kullanılan çimentonun yerine bir miktar mineral katkı ikame edilerek yapılmıştır. Numuneler %1,8'lik $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde $5^\circ C$ ve $25^\circ C$ sıcaklıklarda 3 yıl bekletilmiştir. Kalkerli çimento, uçucu küllü, yüksek fırın curufu veya metakaolin ile tasarlanmış betonun tomasit sülfat saldırısına dayanma kabiliyetine sahip olduğu anlaşılmıştır. Doğal puzolan ilavesi, betonun sülfat direncine yalnız sınırlı bir iyileşme sağlamıştır. Son olarak $25^\circ C$ 'de sülfat çözeltisine maruz kalan numunelerde herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir (A.Scarapoulou ve ark. 2012).



Şekil 2.6. %1,8'lik $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde $5^\circ C$ sıcaklıklarda 3 yıl bekletilen beton numunelerinin hasar durumu LC1: Klinker %85, %15 kalker (a),(f); LPC: %80 LC1, %20 Doğal puzolan (b),(g); LFC: %70 LC1 %30 Uçucu kül(c),(h); LSC: %50 LC1, %50 Yüksek fırın cürufu(d),(i); LMC: %90 LC1, %10 Metakaolin (e),(j)(A.Scarapoulou ve ark. 2012).



Şekil 2.7. Kalkerli ve Killi agrega kullanılarak hazırlanan ve %1,8'lik $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde $5^\circ C$ ve $25^\circ C$ sıcaklıklarda 3 yıl bekletilen beton numunelerinin dayanımları (a) $5^\circ C$ ve (c) $25^\circ C$ Killi agregada

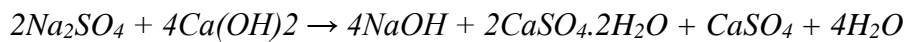
bekletilen numuneler, (b) 5 °C ve (d) 25 °C Kalkerli agregada bekletilen numuneler (A.Scarapoulou ve ark. 2012).

A.Scarapoulou, spesifik mineral katkıların kullanılmasının, kalkerli çimento betonunun sülfat saldırısına karşı direnci artırdığı tespit etmiştir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin en iyi davranışı gösterdiğini doğal puzolanın ise sülfat direncine sınırlı gelişme sağladığını gözlemlemiştir. Kullanılan kumun cinsinin çimento hamuru ile kohezyonu, düşük sıcaklıklarda betonun performansı üzerinde dikkate değer bir etki göstermiştir. Ayrıca kalkerli çimento betonu silisli betondan daha iyi performans göstermiştir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin ile yapılan kalkerli çimento betonunda düşük sıcaklıkta bozunma gözlenmemiştir. Kalkere uygun mineral katkıları ile yapılan iyi tasarlanmış bir beton, tomasit sülfat saldırısına karşı dayanıklıdır sonucuna ulaşılmıştır (A.Scarapoulou ve ark. 2012).

2.2. Sülfatların Betonda Oluşturduğu Zararlı Reaksiyonlar

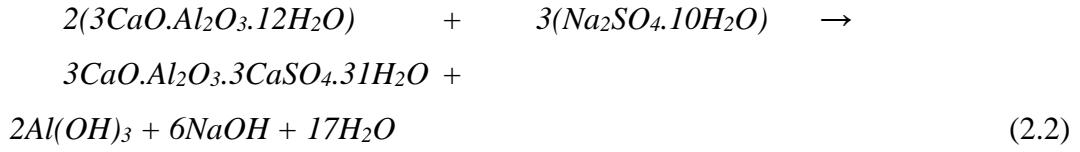
Beton, sülfat ve nemli ortamlarla temas ettiğinde sülfatların çimento bileşenleriyle özellikle C₃A ile reaksiyonu sonucunda etrenjit oluşumu meydana gelir ve bu durum sertleşmiş betonda hacim artışına, dolayısıyla çatlama, saçılma ve parçalanma gibi hasarlara sebep olur (Göktepe, 2008). Betonun uzun süre sülfat etkisine maruz kalması, mukavemetini, dayanıklılığını ve rijitliğini kaybederek parçalanmasına yol açar (Ilıca, 2008). Yeraltı ve deniz suyu ortamlarında yaygın olarak bulunan Na₂SO₄, MgSO₄, K₂SO₄ ve CaSO₄ tuzları beton yüzeyiyle temas ederek çeşitli reaksiyonlara neden olur. Magnezyum sülfat dahil olmak üzere sülfat tuzları, beton için zararlıdır ve MgSO₄'un zararlı etkisi en yüksektir (Neville, 2004). Sodyum sülfat saldırısı durumunda, oluşan sodyum hidroksit C-S-H stabilitesi için gerekli olan alkalitenin korunmasını sağlarken, magnezyum sülfat saldırısı sonucunda açığa çıkan magnezyum hidroksit ve alçıtaşı C-S-H kararlılığını bozar. Bu nedenle, beton için magnezyum sülfat saldırısının daha tehlikeli olduğu düşünülmektedir (Mehta ve Monteiro, 2006).

2.1 numaralı denklemde gösterilen Na₂SO₄ ve Ca(OH)₂ arasındaki reaksiyon, katı ve sıvı fazlar arasında gerçekleşir. Bu reaksiyon sonucunda, katı fazın hacmi %124 oranında artar.



(2.1)

C₃A, çimento bileşenleri arasında en fazla sülfat reaksiyonlarına izin veren bileşendir ve Na₂SO₄ ile reaksiyona girerek denklem 2.2'de gösterildiği gibi tepkimeye girer:



CaSO₄ ve C₃A reaksiyonu sonucunda ve 3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.31H₂O (kalsiyum sülfat alüminat) oluşur. Tamamlanan reaksiyonun neticesinde katı faz hacminde %227 artış gözlemlenir.

Bunun yanı sıra, magnezyum sülfat, Ca(OH)₂ ve C₃A'dan farklı olarak, kalsiyum silikat hidratlar ile reaksiyona girerek denklem 2.3'teki sonucu oluşturur:



Reaksiyon sonucu oluşan Mg(OH)₂, çok düşük çözünürlüğe sahip olsa da, çimento hamurundaki kalsiyum silika hidrat jel yapısı bozulana kadar reaksiyon devam etmektedir (Göktepe, 2008; Eren, 2016).

Sülfat içerikli ortamlarda kullanılacak betonarme yapılar için yüksek C₃A içeriğine sahip çimentolar uygun değildir. TS EN 197-1 (2012) standardına göre çimento tiplerinin birleşim özellikleri ve uygunluk kriterleri belirlenmiştir. Bu standarda göre sülfatlı ortamlarda kullanılacak SR çimentonun C₃A oranı %5'i geçmemelidir (Doğan, 2008).

2.3. Sülfatların Reaksiyonlarının Gelişimini Etkileyen Parametreler

Sülfatlar, katı haldeyken betona zarar vermezler ancak nemli ortamlarda bulduklarında çeşitli reaksiyonlar gerçekleştirirler. Bu reaksiyonların gelişimini etkileyen faktörler ise aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Ortam şartları ve sülfat muhteviyatı
- Betonda kullanılan çimento cinsi
- Betonun geçirimsizliği

2.3.1. Ortam şartları ve sülfat muhteviyatı

Sülfat iyonlarının etkisi nedeniyle betonun buzunması ile ilgili çalışmalar yıllardır sürdürülmektedir. Yeraltı duvarlarında, özellikle deniz ortamında betonun dayanıklılığı yıllardır araştırmacıların ilgi odağıdır. Deniz suyu, litre başına ortalama 2800-3000 mg sülfat içerir ve bu bileşikler, betondaki Portland çözeltilisi (Ca(OH)₂) ile

reaksiyona girerek etrenjit adı verilen bir katı oluşumuna neden olurlar. Sülfat içeren bileşikler, betondaki mikro boşlukları doldurarak genleşme kuvveti oluştururlar. Bu genleşme kuvveti, mikro çatlakların oluşmasına ve büyümesine neden olarak betonun parçalanmasına ve dağılmasına yol açar. C_3A ve C_3S içeriği düşük çimentolar kullanılarak, mineral katkı maddeleri ilave edilerek ve diğer kontrollere dikkat edilerek, etrenjit ve alçı ile kimyasal korozyonun önüne geçilebilir (Benli ve ark., 2017).

Çimento hidrasyonunun ürünü olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ve kalsiyum alüminat hidratları (C_3A) gibi bileşenler tarafından sülfatlar kimyasal olarak bağlanır. Bu bağlanma süreci, sülfatların betonun içinde reaksiyona girmesini ve betonun bozulmasına sebep olur.

Alçı, $Ca(OH)_2$ veya C-S-H, sülfat ve suyun reaksiyon ürünüdür. Alçıtaşı oluşumu sertlik ve mukavemette azalmaya, genleşmeye ve çatlamaya neden olarak malzemenin yapışkan olmayan bir kütleyle dönüşmesine sebep olur. Ayrıca SO_4^{2-} , Ca^{+2} ve monosülfat (C_4ASH12) arasındaki reaksiyon sonucu ikincil etrenjit oluşur. Etrenjit, betonun çatlamasına ve tahribatına neden olan kuvvetli bir şekilde şişme özelliğine sahiptir. Ayrıca, tomasit oluşumu mukavemet kaybına ve mikro yapının bozulmasına yol açar. Tomasit, sülfatların, etrenjitin C-S-H, CO_2 , Ca^{2+} ve fazla su ile reaksiyona girmesi neticesinde ve $15\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda oluşur (Maes ve De Belie, 2017).

Dış sülfat etkisi, betonun mikro yapısı, gözenekliliği ve geçirgenliği ile betonla temas halindeki dış ortamdaki sülfat konsantrasyonu ve betonun C_3A içeriği gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenir. Bu faktörlerin etkisi, katyon tipi, pH ve ortam sıcaklığından da etkilenir. Örneğin, Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ gibi maddeler, gözenek çözeltilisinin alkalinitesi üzerinde zıt etkilere sahiptir. Na_2SO_4 alkaliliği artırırken, $MgSO_4$ alkaliliği azaltır. Ayrıca, katyon tipinin OH^- konsantrasyonunu da etkilediği görülmektedir (De Weerd vd., 2014).

2.3.2. Betonda kullanılan çimento cinsi

Betonda kullanılan çimentonun kimyasal içeriği ve de C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) muhteviyatı reaksiyonun oluşumuna sebep olan en önemli faktörlerdir. C_3A , çimento ve su arasındaki hidrasyonda çözünür ve yüksek miktarda ısı açığa çıkarır. Çimento üretiminde klinkerin varsa katkı maddeleri ile öğütülmesi sırasında alçıtaşı eklenerek etrenjit oluşturularak C_3A 'nın hidrasyon oranını ayarlanır. Alçı eklenmezse, C_3A çimentosu hızla katılaştır. C_3A miktarı az olan çimentolar özellikle sülfat içeren su ve toprağa karşı dayanıklıdır. Yüksek C_3A oranı, betonun dışındaki sülfatların betona

nüfuz ederek C_3A ile reaksiyona girmesine neden olabilir ve bu da betonda ciddi problemlere yol açabilir. ASTM standartları, sülfata orta derecede dayanıklı olan en fazla %8 C_3A içeren çimentoları, sülfata çok dayanıklı olan en fazla %5 C_3A içeren çimentoları sınırlandırmaktadır. Avrupa'da ise C_3A miktarı en fazla %3 olarak kabul edilmektedir (Ilıca, 2008).

2.3.3. Betonun geçirimsizliği

Beton yapıların dayanıklılığı, boşlukların oluşumu ve betonun geçirgenliği gibi faktörlere bağlıdır. Bu boşluklar, taze betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi sırasında oluşan kılcal boşluklar, hava kabarcıkları veya agrega tanelerinin içindeki boşluklar gibi çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilir. Betonun sülfata karşı direnci de betonun geçirgenliği ile yakından ilişkilidir. Sülfat etkisi, betonun boşluk yapısını değiştirerek çatlakların oluşmasına neden olur ve betonun geçirgenliğini artırarak bozulma sürecini hızlandırır. Bu nedenle, betonun geçirgenliği düşük ve boşluk yapısının minimum seviyede olduğu beton yapılarının tasarımı ve inşası oldukça önemlidir.

Betonun su geçirimsizliği ve dayanıklılığı, çimentonun kimyasal yapısı ve dozajı ile s/c oranının doğru bir şekilde ayarlanmasıyla büyük ölçüde etkilenir. Su, sülfat reaksiyonlarının gerçekleşmesinde önemli bir rol oynar ve sülfat iyonlarının betondaki boşluklara taşınmasına neden olabilir. Bu nedenle, betonun yeraltı sularıyla temas eden kısımlarının drenajı sağlanmalı veya yapıların kuruluk seviyesi korunarak reaksiyonun gelişmesi önlenmelidir. Bu amaçla, etkili bir yöntem olarak drene edilmesi gereken yapılar veya temeller gibi yerlerde uygulanabilir (Uygunoğlu vd., 2006).

2.4. Sülfat Saldırısına Karşı Alınacak Önlemler

Betonun doğal topraklardan ve yeraltı sularından kaynaklanabilecek zararlı kimyasal etkilere karşı önlem almak önemlidir. Bunun için, çimento kullanımı için belirlenen sınır değerler ve betonun s/c oranı TS EN 206 standardını geçmemelidir. Ayrıca, betonun doğru bir şekilde üretildiğinden emin olmak için sülfatlara dayanıklı çimento kullanımı, kimyasal katkılar, puzolanik mineral katkılar, daha geçirimsiz beton üretimi, betonun dıştan kaplanması ve en fazla s/c oranı 0,45 olan beton kullanımı gibi önlemler alınabilir. TS EN 206 standardında, sülfat iyonlarının zararlı aktivite düzeyleri çeşitli sınıflara ayrılmıştır ve betonun kullanılacağı çevre koşullarına göre uygun sınıflandırmalar kullanılmalıdır. TS EN 206 standardında belirtilen sülfat iyonlarının zararlı aktivite düzeyleri, betonun sülfata dayanıklılığını belirlemek için kullanılan bir ölçüttür. Bu düzeyler betonun kullanılacağı çevre koşullarına göre değişebilir. Sülfat

iyonlarının zararlı aktivite düzeyleri, betonun içindeki çimento ve su miktarına bağlı olarak belirlenir. TS EN 206 standardında belirtilen sülfat iyonlarının zararlı aktivite düzeyleri, Çizelge 2.1'de sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada, sülfat iyonlarının konsantrasyonlarına ve betonun dayanıklılık sınıfına göre farklı seviyeler belirlenmiştir. Betonun sülfata dayanıklılığı, belirli bir sülfat iyonu konsantrasyonuna kadar kabul edilebilir seviyede olabilir. Ancak sülfat iyonu konsantrasyonu bu seviyeyi aştığında, betonun dayanıklılığı azalmaya başlar ve hatta çözünebilir hale gelerek bozulmaya başlar.

Çizelge 2.1. TS EN 206'da betonun zararlı kimyasal etki durumuna göre sınır değerler

| Sülfat ortamı | Suda SO ²⁻ (mg/l) | Zeminde SO ²⁻ (mg/kg) | Kullanım şartı | | |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| | | | En büyük s/c 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 |

TS EN 206 standardına göre, kimyasal etkilerin zararları düşükse, sülfata dayanıklı çimento kullanımı zorunlu olmasa da tavsiye edilir. Ancak, orta derecede zararlı kimyasal etkiler varsa, C₃A değeri %8'den küçük olan bir çimento kullanılması önerilir. Eğer kimyasal etkiler çok zararlıysa, sülfata karşı yüksek derecede dayanıklı olan C₃A değeri %5'ten küçük bir çimento kullanılması gerekmektedir. Bu tedbirler, betonun sülfat saldırılarına karşı dayanıklılığını artırır ve yapıların ömrünü uzatır.

Puzolanik katkıları, beton içindeki Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jel tabakalarının oluşumuna ve betonun daha geçirimsiz hale gelmesine yardımcı olur. Ayrıca, sülfatlar ile reaksiyona girerek bileşikler oluşturarak betonun dayanıklılığını artırır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül de betonun sülfata dayanıklılığını artırmada etkili katkılardır. Bu nedenle, betonun şiddetli kimyasallara maruz kalması durumunda, uygun katkıları kullanarak betonun dayanıklılığını artırmak önemlidir (Uygunoğlu vd., 2006).

Sülfat saldırısından korunmak için kullanılan etkili yöntemlerden biri, betona puzolanik mineral katkıları eklemektir. Betonun sülfat saldırısına karşı direncini artırmak için çimentonun kısmen silis dumanı ile değiştirilmesi de önerilmektedir. Bu yöntem, alçı ve etrenjit için gerekli olan Ca(OH)₂ ve alüminatın azalmasına ve gözenek yapısının iyileşmesine yol açar. Ayrıca, betonun sülfat saldırısına karşı direncini

artırmak için yeterli miktarda uçucu kül kullanılması da önerilir. (Benli vd., 2017). Betonun sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını artırmak için kullanılan yöntemler arasında, özellikle düşük kalsiyum veya F sınıfı uçucu külün etkili olduğu birçok çalışma tarafından gösterilmiştir. Bu katkı maddeleri, betonun sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını artırmak için etkili bir şekilde kullanılabilir.

Betonarme yapıları zararlı kimyasal ortamlardan korumanın etkili bir yöntemi de kaplama teknolojisidir. Özellikle şiddetli sülfat atağına maruz kalan yapılar, her tarafı geçirimsiz bir malzeme ile kaplanarak korunabilir. Bu yöntemde, sülfata dayanıklı malzemeler, polimer kaplamalar veya bitüm gibi malzemeler kullanılarak betonun dış yüzeyi izole edilir. Ayrıca, suyun yapıya ulaşmasını önlemek için drenaj kanalları açılarak beton daha da korunabilir. Bu yöntem, yapıların sülfat saldırısına karşı dayanıklılığını artırmada oldukça etkilidir ve birçok çalışma bu yöntemin başarısını kanıtlamıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Farklı çimentoların sülfat etkisi altındaki davranışının incelenmesini kapsayan bu çalışmada beş farklı çimento üretilmiştir. Katkısız, kalkerli, traslı ve kalker tras karışımli çimentolar ile sülfata dayanıklı çimentolar deneyde kullanılmak üzere üretilmiştir. İç Anadolu ve özellikle Konya bölgesi civarında kül, uçucu kül, silis dumanı gibi katkılara ulaşmak maliyet ve sürdürülebilirlik anlamında çok zordur. Bu bölge genel anlamda kalker ve tras ile kaplıdır (Kaplan vd., 1995). Sülfatlı yeraltı suyu içeren bölgeler ile zemin yapısında sülfat muhtevası olan bölgeler için erişilebilirliği kolay, sülfat dayanımı yüksek, maliyeti düşük sürdürülebilir bir çimento tipi kullanmak çok uygun olacaktır. Bu sebeple düşük incelik ve yüksek blaine değerlerine sahip kalker katkıli çimentoların, kalkerin sağlayacağı dolgu etkisi ve geçirimsizliği artıracığı düşüncesi ile sülfat dayanımına etkisinin araştırılmasına karar verilmiştir. Üretilen kalkerli çimentonun yine aynı bölgede erişimi kolay katkısız, traslı ve kalker tras karışımli çimentolar ile kıyaslaması yapılmıştır. Deneyde kullanılan kalker ve trasın detaylı analizleri çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Üretilen çimentolarda katkı olarak kullanılan kalker ve tras analizleri

| Kimyasal ve fiziksel içerik | | Kalker | Tras |
|--------------------------------|-----|--------|-------|
| SiO ₂ | % | 1,04 | 64,64 |
| Al ₂ O ₃ | % | 0,42 | 16,93 |
| Fe ₂ O ₃ | % | 0,11 | 5,33 |
| CaO | % | 53,93 | 4,64 |
| MgO | % | 0,30 | 1,08 |
| SO ₃ | % | 0,09 | 0,00 |
| K ₂ O | % | 0,02 | 3,42 |
| Na ₂ O | % | 0,02 | 3,00 |
| Cl | % | 0,018 | 0,002 |
| Kızdırma kaybı | % | 44,67 | 2,64 |
| Rutubet | % | 1,86 | 13,0 |
| Puzolanik aktivite | Mpa | | 5,7 |
| Reaktif SiO ₂ | % | | 28,1 |

Aynı dayanım sınıfına ait olması planlanan beş farklı katkı oranına sahip çimento Konya Çimento üretim tesislerinde üretilmiştir. Üretilen çimentoların katkı içerikleri çizelge 3.2’de sunulmuştur. Üretilen çimentoların katkı miktarları ve incelikleri daha önceki üretim tecrübelerine istinaden belirlenmiştir. Üretilen beş tip çimentonun 28 günlük dayanımları kontrol edilmiştir. Üretilen çimentoların 28 günlük dayanım değerleri çizelge 3.3’de sunulmuştur. Aynı dayanım sınıfına ait olduğu tespit

edilen farklı katkı oranlarına sahip çimento tiplerinde sülfat dayanımı testlerine başlanmıştır.

Çizelge 3.2. Üretilen çimentoların katkı miktarları

| Numune | Kısa isim | Klinker (%) | Alçıtaşı (%) | Tras (%) | Kalker (%) |
|-------------------------|------------|-------------|--------------|----------|------------|
| CEM II/A M (P-L) 42,5 R | CEM II/A | 78,05 | 5,89 | 8,70 | 7,36 |
| CEM I 42,5 R | CEM I | 88,13 | 5,14 | 0,0 | 6,44 |
| CEM I 42,5 R SR-5 | SR-5 | 88,75 | 4,42 | 0,0 | 6,43 |
| CEM II/A (L) 42,5 R | CEM II A/K | 77,21 | 5,89 | 0,0 | 14,64 |
| CEM II/A (P) 42,5 R | CEM II A/T | 78,56 | 5,11 | 15,56 | 0,77 |

Çizelge 3.3. Üretilen çimentoların 28 günlük dayanım değerleri

| Numune | Kısa isim | 28 Günlük dayanım MPa |
|-------------------------|------------|-----------------------|
| CEM II/A M (P-L) 42,5 R | CEM II/A | 47,0 |
| CEM I 42,5 R | CEM I | 46,0 |
| CEM I 42,5 R SR-5 | SR-5 | 48,6 |
| CEM II/A (L) 42,5 R | CEM II A/K | 46,7 |
| CEM II/A (P) 42,5 R | CEM II A/T | 45,1 |

Üretilen çimentoların fiziksel özellikleri, 28, 40, 90, 150, ve 360. yaş günündeki normal kür ve %3 magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi küründeki mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Deneylerde $MgSO_4$ çözeltisinin seçilmesinde en büyük etken, en zararlı etkinin magnezyum sülfat çözeltilerine maruz kalan betonlarda görülmüş olmasıdır (Kılıç, 2006).

Deneyde magnezyum sülfat çözeltisi hazırlamak için magnezyum-sülfat-heptahidrat ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) kullanılmıştır. Çözeltide esas alınan yüzdeler magnezyum sülfat ($MgSO_4$) için geçerli alınmıştır. Deney sırasında kullanılan kalıp numune adet tabloları çizelge 3.4 ve çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Magnezyum sülfat çözeltisinde kullanılan kalıp numune adet tablosu

| Numuneler | Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) Çözeltisi içinde bekletilen | | | | |
|------------|---|-----------|-----------|------------|------------|
| | 28 günlük | 40 günlük | 90 günlük | 150 günlük | 360 günlük |
| CEM II/A | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CEM I | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SR-5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CEM II A/K | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CEM II A/T | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Toplam | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |

Çizelge 3.5. Normal Kür Havuzunda kullanılan kalıp numune adet tablosu

| Numuneler | Normal Kür Havuzu içinde bekletilen | | | | |
|------------|-------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| | 28 günlük | 40 günlük | 90 günlük | 150 günlük | 360 günlük |
| CEM II/A | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CEM I | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| SR-5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CEM II A/K | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| CEM II A/T | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Toplam | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |

Magnezyum sülfat çözeltilerin hazırlanması için Konya Çimento Beton Laboratuvarı'nda kullanılan şebeke suyu kullanılmıştır. Beton numuneler 28, 40, 90, 150 ve 360 gün magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltileri içerisinde, dış sülfat etkisine maruz bırakılacak şekilde hazırlanmıştır. Kür süresi biten harç numuneleri üzerine basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

Sülfat etkisinin harç dayanımına etki eden temel parametrelerden; çözünmeyen kalıntı (ÇK) (%), serbest kalsiyum oksit (%), kızdırma kaybı (KK) (%), blaine ($cm^2.g^{-1}$), basınç dayanımı testi, 45 μm elek üzerinde kalan (%), 32 μm elek üzerinde kalan (%), elementel analiz parametrelerin ölçüldüğü bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler hakkında bilgiler aşağıda verildiği şekildedir.

3.1. Materyal

Çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan hammadde ve kimyasallar Çizelge 3.6'de, cihaz/ekipmanlar ise Çizelge 3.7'te verildiği gibidir.

Çizelge 3.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan hammadde ve kimyasallar

| Kimyasal Adı | Markası | Üretim yeri | Kullanım amacı |
|--------------|---------|-------------|--|
| Damıtık su | | lab | Deneysel çalışmalarda çözme ve yıkama işlemlerinde |
| HCl | Merck | Almanya | ÇK ve S.CaO tayininde |
| Na_2CO_3 | Merck | Almanya | ÇK tayininde |
| Etilenglikol | Merck | Almanya | S.CaO |
| Metanol | Merck | Almanya | S.CaO |
| Bromtimol | Merck | Almanya | S.CaO |

Çizelge 3.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz/ekipmanlar

| Cihaz/Ekipman adı | Markası | Kullanım amacı |
|--------------------------------|-------------|---------------------------|
| Etüv | | Nem giderilmesi |
| Hassas terazi | | Tartım işlemleri |
| Kül fırını | | Kızdırma kaybı işlemleri |
| Elektrik ocağı | | Isıtma ve yakma işlemleri |
| Manyetik karıştırıcı | | Karıştırma işlemleri |
| Alpin Cihazı | | Eleme işlemleri |
| Alpin Elekleri (45 ve 32 µm) | | Eleme işlemleri |
| Üç gözlü çelik beton kalıp | Atom Teknik | Beton numunesi hazırlama |
| Eğilme dayanımı cihazı | | Prizma numuneleri bölme |
| Test presi ve kırma başlıkları | Toni Teknik | Basınç dayanımı tayini |
| Beton kür dolabı | Astek Kimya | 24 saatlik kürleme işlemi |
| Blain ölçüm cihazı | AtomTeknik | Blain ölçümü |

3.2. Yöntem

Deneysel çalışmalar kapsamında incelenen parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla uygulanan yöntemler aşağıda verilmiştir.

3.2.1. Çözünmeyen kalıntı

Hazırlanan numuneden yaklaşık 50 - 60 gr numune tartılır ve kapaklı vezin kaba alınır. Hassas bir terazide $1.00 \pm 0,05$ gr. numune tartılır. 400 cc'lik beher içine tartılan numunenin üzerine 90 cc damıtık su konur. 10 cc derişik HCl eklenir. Numune topakları baget ile ezilerek karıştırılır. Elektrik ocağı üzerinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılır ve 15 dakika kum banyosu üzerinde bekletilir. Beyaz bant süzgeç kağıdından süzülür ve çökelti sıcak damıtık su ile 8-10 kez yıkanır. Süzüntü SO_3 tayini için saklanır. Çökelti ve süzgeç kâğıdı içine 100 cc %5'lik Na_2CO_3 çözeltilisi olan behere alınır. Baget ile karıştırılarak kaynatılır ve 15 dakika kum banyosu üzerinde bekletilir. Beyaz bant süzgeç kağıdından ikinci kez süzülür. Süzgeç kağıtları ve çökelek 1+19'luk sıcak HCl çözeltilisi ile 4-5 kez sıcak damıtık su ile de 8-10 kez ($AgNO_3$ ile Cl testi yapılarak) yıkanır. Çökelek ve süzgeç kağıtları tartımı belli krozeye alınır. Elektrik ocağında kağıt yakılır. 950 ± 25 °C'de sabit tartıma kadar yaklaşık 30 dakika kızdırılır. Desikatörde soğutulur, kroze içindeki numune tartılır (m_2).

$$\text{ÇK} = m_2/m_1 \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.2. Serbest kalsiyum oksit (S.CaO)

0,5 ± 0,0001 gr numune tartılır (m) ve 250 ml'lik rodajlı erlene alınır. 15 ml Etilenglikol + 7,5 ml metanol çözeltisi eklenir. Manyetik karıştırıcıda veya elde kuvvetlice karıştırılır ve geri soğutucu takılır. Karıştırmaya devam ederken 70°C'ye kadar ısıtılır ve bu ısıda 20 dakika bırakılır. Çözelti mavi süzgeç kağıdında süzülür. Süzüntüye 3-4 damla bromtimol mavisi damlatılır. 0,1 N HCl ile sarı renk oluncaya kadar sık aralıklarla titrasyon yapılır (V).

$$\%S.CaO = F \times V \times 0,28 / m \quad (3.2)$$

3.2.3. Kızdırma kaybı

Hazırlanan numuneden yaklaşık 1gr numune alınır. Hassas bir terazide 1,00±0,05 gr. numune krozeye tartılır (m₁). Kroze ve numune 950 ± 25 °C'de 20 -30 dakika kızdırılır. Desikatörde soğutulur, kroze içindeki numune tartılır (m₂).

$$\%K.K. = (m_1 - m_2) / m_1 \quad (3.3)$$

3.2.4. Blaine

Hazırlanan çimento numunesinden 100-120 gr numune 500 cc'lik ağzı kapaklı cam kavanoza alınır ve 2 dakika sallanır. Kavanozun ağzı açılmadan biraz beklenir. Deney için tartılacak numune miktarı hesaplanır ve tartılır. Silindir hücrenin tabanına delikli disk yerleştirilir. Süzgeç kâğıdı aparat yardımıyla diskin üzerine dikkatlice indirilir. Tartılan çimento numunesi cam huni yardımı ile silindirik hücreye kayıpsız boşaltılır. İkinci filitre kağıdı çimento numunesi üzerine aparat yardımı ile indirilir. Ağırlık diski ve piston hücrenin üstüne konur. Pistonun üst çıkıntısının alt yüzü hücrenin üst bölgesine değinceye kadar çimento numunesi de sıkıştırılarak hafifçe bastırılır. Hacim ve yoğunluk doğru belirlendi ise tartılan çimento numunesi hücre yatağını tam olarak doldurmuş olur. Silindir hücre blaine cihazındaki yerine takılır. Piston dikkatlice çıkartılır. Ölçüm İşlemi Otomatik olarak başlatılır. Cihazın ekranında görünen zaman değeri okunur (t, sn). Deney sırasındaki oda sıcaklığı hava viskozitesini tablodan bakmak için kaydedilir.

$$\text{Blaine} = K \times e^{1/3} \times t^{1/2} / (\rho \times (1-e)^{1/2} \times (0,1\eta)^{1/2} \quad (3.4)$$

K: Ekipman sabiti

ρ : Çimentonun yoğunluğu

η : Deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi

t: Süre



Şekil 3.1. Otomatik Blaine cihazı

3.2.5. 45 μ m ve 32 μ m elek üzerinde kalan

10 mm elek altına geçirilen numuneden yaklaşık 10 gr numune (m) tartılır. Numune Alpin cihazına takılan 32 μ / 45 μ elek üstüne bırakılır. Alpin cihazının üst kapağı kapatılır. Alpin çalıştırılarak numune 3 dakika hava ile sürüklemeli bir şekilde elenir. Kapak içindeki yapışmaları önlemek için ucu lastikli çekiçle kapağın üstüne vurulur. Süre dolunca cihaz otomatik olarak durur. Elek üstünde kalan miktar hassas bir terazide tartılır (m_1). Tartılan miktar bu sefer 45 μ / 32 μ elek üstüne bırakılır. Cihazdan çıkan numunenin tartımı alınır (m_2). Aynı işlemler 200 μ içinde yapılır ve tartımı alınır (m_3).

$$R_{32} = m_1/m \quad (3.5.)$$

$$R_{45} = m_2/m \quad (3.6.)$$



Şekil 3.2. Alphin elek cihazı ve elekler

3.2.6. Basınç dayanımı

Hazırlanacak beton pastası için TS EN196-1 standardında belirtilen miktarlar dikkate alınarak çimento numunesi ve su harç karıştırma makinasına konularak karıştırılır. Karıştırmaya standart norm kumu eklenerek devam edilir. Karışım 16 cm x4 cmx4 cm çelik beton kalıplara yerleştirilir. Elde edilen numune yirmi dört saat sonra kalıplardan çıkarılarak 2, 7 ve 28 günlük dayanım testleri için kür dolabına konulur. İlgü günü gelen harç numunesi dayanım testi için test presinde kırılarak sonuçlar kaydedilir. Tüm testler TS EN 196-1 standardı referans alınarak yapılır.



Şekil 3.3. (a) harç karıştırma makinesi ve karıştırma kabı, (b) üç gözlü çelik beton kalıbı, (c) sarsma cihazı

3.2.7. Kıvam suyu tayini

Hazırlanan çimento numunesinden 500 ± 1 gr numune tartılır, karıştırma kabına konular ve orta kısmı çukurlaştırılır. Bu çukurlaştırılan kısma bir miktar su konur (çimentonun cinsine göre 120-130 gr). Çimento ve suyun kap içine konma işlemi, çimento veya su miktarında herhangi bir kayba meydan vermeden 10 sn. içinde tamamlanır. Koyulan su miktarı (gr) ve zaman kaydedilir. Mekanik karıştırıcıda çimento ve su karışımı 90 sn. süreyle karıştırılır. 30 sn. beklenir ve 90 sn. süreyle tekrar karıştırılır (Karıştırma süresi toplam 3 dak.). Karıştırılarak yapılan çimento pastası, yağlanmış cam levha üzerine oturtulan vikat kalıbı içine hemen yerleştirilir. Kalıbın üstüne taşan kısım düz kenarlı spatula ile testere hareketi ile sıyırılarak yüzey düzeltilir. Vikat cihazına sonda takılır ve boş cam plaka üzerinde taksimatlı kısım “0” konumuna getirilir. Sonda tekrar yerine kaldırılır. İçi çimento pastası ile dolu vikat kalıbı ve cam plaka sondanın altına yerleştirilir. Sonda çimento pastası üzerine değdirilmeden yaklaştırılır ve serbest bırakılır. Sonda ve cam plaka arasındaki mesafe 6 ± 2 mm değil ise değişik su miktarları ile deney tekrar edilir. Sonda ve cam plaka arasındaki mesafe 6 ± 2 mm ise su miktarı (m1) doğrudur ve standart kıvam için gerekli su miktarı kayıt edilir.



Şekil 3.4. Manuel vikat cihazı ve vikat kalıbı

Sonda takılmış ve boş cam plaka üzerinde taksimatlı kısım “0” konumuna getirilmiş manuel vikat Cihazı Şekil 3.4.’te gösterilmiştir. Çimento hamuru yerleştirilen kalıp ve cam plaka sondanın altına yerleştirilmiştir. Sonda çimento hamuru üzerine

temas ettirilmeden yaklaştırılıp serbest bırakılmıştır. Değişik su miktarları ile deney sonda ve cam plaka arasındaki mesafe 6 ± 2 mm olana kadar tekrar edilmiştir. İstenilen mesafe olan 6 ± 2 mm değerine ulaşıncaya kullanılan su miktarı (m_1 , mL olarak) standart kıvam için gerekli su miktarı olarak tayin edilmiştir. (3.7) Deneyde yapılan analizler TS EN 196-3 esas alınarak yapılmıştır.

$$\text{Su miktarı} = m/500 \times 100 \quad (3.7.)$$



4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Başlıkların yazılması kontrol edilecek 2. Derece başlıklar ilk harf büyük

4.1. Üretilen Çimentoların, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ve Dayanımlarının Takibi

Üretilen çimentoların kimyasal içerikleri Çizelge 4.1’de, fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Kimyasal analiz sonuçlarına göre, en düşük C₃A miktarının SR-5 çimentosunda, en yüksek C₃A miktarının ise CEM II A/T çimentosunda olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretilen çimentoların kimyasal içerikleri

| Kimyasal içerik | CEM II/A | CEM I | SR-5 | CEM II A/K | CEM II A/T |
|--------------------------------|----------|---------|--------|------------|------------|
| SiO ₂ | 21,26 | 18,6 | 19,38 | 17,97 | 24,86 |
| Al ₂ O ₃ | 5,12 | 4,52 | 4,35 | 4,38 | 6,13 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,44 | 4,16 | 4,54 | 3,96 | 5,51 |
| CaO | 58,52 | 61,36 | 61,71 | 62,34 | 53,61 |
| MgO | 1,06 | 1,1 | 1,15 | 0,97 | 1,18 |
| SO ₃ | 3,55 | 3,21 | 2,89 | 3,55 | 3,2 |
| K ₂ O | 0,88 | 0,69 | 0,61 | 0,74 | 1,03 |
| Na ₂ O | 0,49 | 0,33 | 0,32 | 0,36 | 0,63 |
| Cl | 0,0177 | 0,00203 | 0,0182 | 0,0179 | 0,0165 |
| C ₃ A | 6,06 | 4,94 | 3,85 | 4,91 | 6,92 |
| C ₄ AF | 13,51 | 12,66 | 13,82 | 12,05 | 16,77 |

Çizelge 4.2. Üretilen çimentoların fiziksel özellikleri

| Numune | CEM II/A | CEM I | SR-5 | CEM II A/K | CEM II A/T |
|-------------------------|----------|-------|------|------------|------------|
| Bf (cm ² /g) | 4228 | 3721 | 3689 | 4713 | 4046 |
| 32 µm (%) | 6,9 | - | - | 5,5 | 9,2 |
| 45 µm (%) | 2,5 | 5,6 | 3,0 | 1,7 | 4,1 |
| Ç.K. (%) | 7,68 | 0,45 | 0,54 | 2,14 | 13,58 |
| Su ihtiyacı (%) | 29,0 | 27,8 | 28,3 | 28,3 | 29,3 |
| Priz başlangıç (dk) | 140 | 150 | 155 | 150 | 255 |
| Priz bitiş (dk) | 220 | 220 | 230 | 220 | 345 |

Çimentoların yüzey alanları ve incelik değerleri incelendiğinde, yüzey alanı en yüksek olan çimento CEM II/ A Kalkerli olarak tespit edilmiştir. Yüzey alanı en düşük çimento SR-5’tir. Ayrıca kalkerli çimentonun 32 µm elek bakiyesi 5,5%’tir. Hem incelik hem yüzey alanı değerlerinden anlaşıldığı üzere, kıyaslama yapılacak çimentolar arasında en ince öğütülen tipin kalkerli çimento olduğu görülmektedir. Tras içeren çimento tiplerinin su ihtiyaçları diğer çimento tiplerine göre daha fazladır.

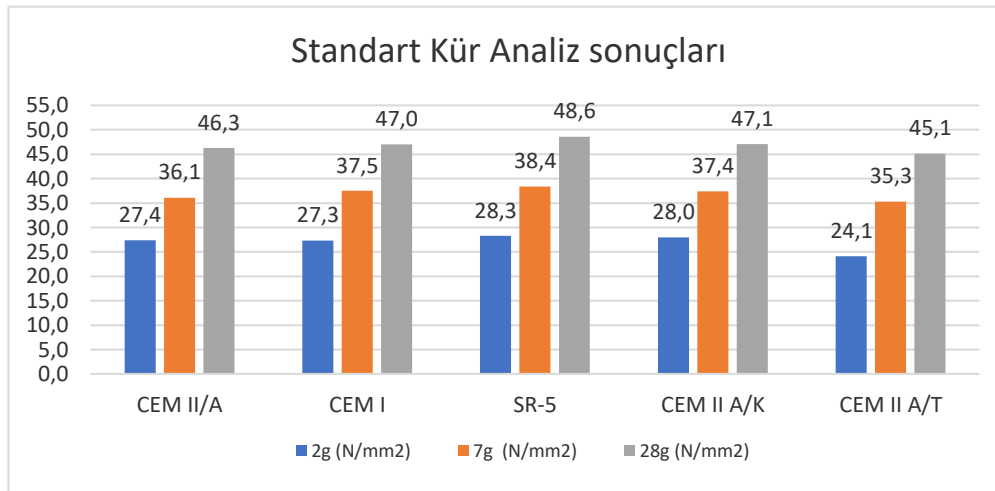
Fiziksel ve kimyasal analizler incelendiğinde deneyde kullanılmak üzere hazırlanan bütün çimento tiplerinin TS EN 197-1 standardının gerekliliklerini yerine

getirdiği görülmüştür. Standartta geçen karakteristik değerler olarak verilen mekanik ve fiziksel gerekler tablosu Çizelge 4.3'te görülebilir.

Çizelge 4.3. Karakteristik değerler olarak verilen mekanik ve fiziksel gerekler (TS EN 197-1)

| Çimento Tipi | Çimento Adı | Standart Dayanım | | | Sülfat Miktarı (SO ₃) | C ₃ A |
|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------|-------|-----------------------------------|------------------|
| | | Erken Dayanım 2 günlük MPa | 28 günlük MPa | | | |
| CEM I 42.5 R | Portland Çimento | > 20 | > 42,5 | <62,5 | < % 4,0 | - |
| CEM I 42.5 R-SR5 | Sülfata Dayanıklı Portland çimentosu | >20 | > 42,5 | <62,5 | < % 4,0 | < % 5,0 |
| CEM II/A (L) 42.5 R | Portland Kalkerli Çimento | >20 | > 42,5 | <62,5 | < % 4,0 | - |
| CEM II/A (P) 42.5 R | Portland Puzolanik Çimento | >20 | > 42,5 | <62,5 | < % 4,0 | - |
| CEM II/A M (P-L) 42.5 R | Portland Kompoze Çimento | >20 | > 42,5 | <62,5 | < % 4,0 | - |

Çalışmada kullanılan çimentoların TS EN 197-1 standardının gerekliliğinin test edildiği 2,7 ve 28 günlük dayanım sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Kullanılan bütün çimento tipleri 42,5 MPa dayanım sınıfına aittir. Ayrıca TS EN 197-1 standardının bir gerekliliği olan 2 günlük erkan dayanım değerlerinin bütün çimento tiplerinde 20 MPa üzerinde olduğu tespit edilmiştir.



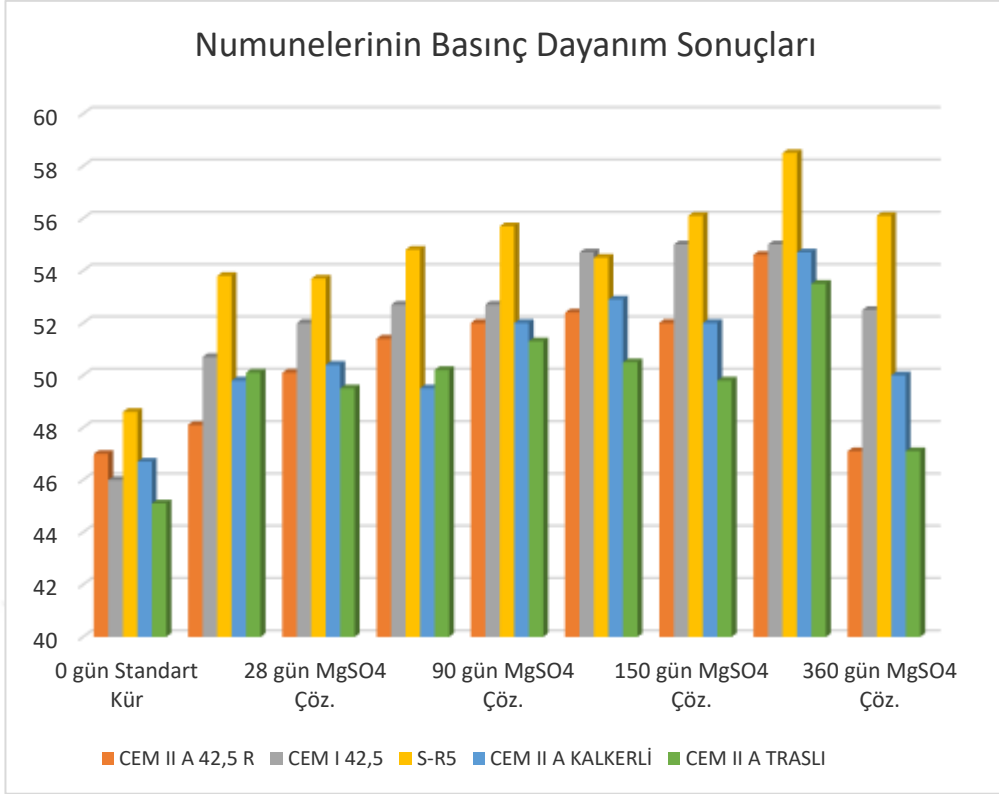
Şekil 4.1. Deneyde kullanılan çimentolar ile hazırlanan harç karışımların 2.-7. ve 28. gün basınç dayanımı sonuçları

4.2. Üretilen Çimentoların Sülfat Saldırısı Sonucu Basınç Dayanım Testleri

Üretilen çimentoların ilk aşamada standartlara uygun ve aynı dayanım sınıfına ait oldukları tespit edildikten sonra, ikinci aşamada Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te gösterildiği gibi her çimento tipi için 30 adet hazırlanmış ve 15 adedi magnezyum sülfat çözeltisinde, 15 adedi standart kür havuzunda bekletilen kalıp numunelerinin 28., 40., 90., 150., ve 360. günlerde basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan çimentolar ile hazırlanan harç karışımların 28., 90., 150., ve 360. gün basınç dayanım sonuçları Şekil 4.2 ve Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Harçların Basınç Dayanım Değerleri (Mpa)

| | | Harçların Basınç Dayanım Değerleri (Mpa) | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|--|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| | | 28. Gün | 90. Gün | 150. Gün | 360. Gün | 28. Gün | 90. Gün | 150. Gün | 360. Gün |
| | | Referans | Referans | Referans | Referans | Çözelti | Çözelti | Çözelti | Çözelti |
| CEM II/A M (P-L) 42.5 R | Portland Kompoze Çimento | 48,1 | 51,4 | 52,4 | 54,6 | 50,1 | 52 | 52 | 47,1 |
| CEM I 42.5 R | Portland Çimento | 50,7 | 52,7 | 54,7 | 55 | 52 | 52,7 | 55 | 52,5 |
| CEM I 42.5 R-SR5 | Sülfata Dayanıklı Portland çimentosu | 53,8 | 54,8 | 54,5 | 58,5 | 53,7 | 55,7 | 56,1 | 56,1 |
| CEM II/A (L) 42.5 R | Portland Kalkerli Çimento | 49,8 | 49,5 | 52,9 | 54,7 | 50,4 | 52 | 52 | 50 |
| CEM II/A (P) 42.5 R | Portland Puzolanik Çimento | 50,1 | 50,2 | 50,5 | 53,5 | 49,5 | 51,3 | 49,8 | 47,1 |



Şekil 4.2. Deneyde kullanılan çimentolar ile hazırlanan harç karışımların basınç dayanım sonuçları

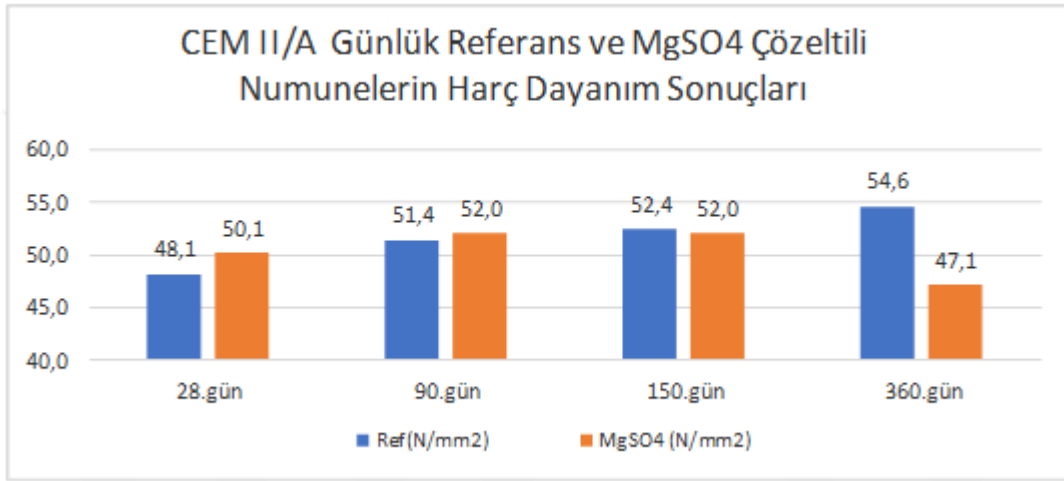
Bütün kırılmalar 28 günlük normal kür süresinden sonra başlangıç 0 kabul edilerek gerçekleştirilmiştir.

Kırım sonuçlarına göre 150. güne kadar bütün tiplerde, sülfat çözeltisi içerisindeki numuneler de dahil artış gözlemlenmiştir. Erken yaşlarda olması beklenen bir durumdur. Dayanım düşüşün 150 gün zarfında tespit edilmemesinin nedeni, magnezyum sülfatın, çimento hamurunun bağlayıcılığını sağlayan kalsiyumsilika-hidrat jelleri ile de reaksiyona girmesinin ve bu jellerin bir miktarının çözünmesine neden olmasının oldukça yavaş bir reaksiyon olmasından kaynaklanmaktadır.

360. gün sonundaki kırım sonuçlarına göre bütün tiplerde, sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerde düşüş gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat solüsyonunda numunelerin mukavemet artışının durduğu hatta azaldığı gözlemlenmiştir. Dayanım düşüklüğünün sebebi magnezyum sülfatın, betonda alçı oluşumuna ve yarı kararlı durumdaki C_4ASH_{12} ürünlerinin etrenjit oluşumuna neden olmasıdır. Ayrıca, çimento hamurunun bağlanmasını sağlayan kalsiyum silikat-hidrat jelleri ile reaksiyona girerek bu jellerin bir kısmının çözünmesine neden olur. Bu reaksiyon sonucunda oluşan silika jel, magnezyum hidroksit ile çok yavaş reaksiyona girerek, bağlayıcı değeri olmayan

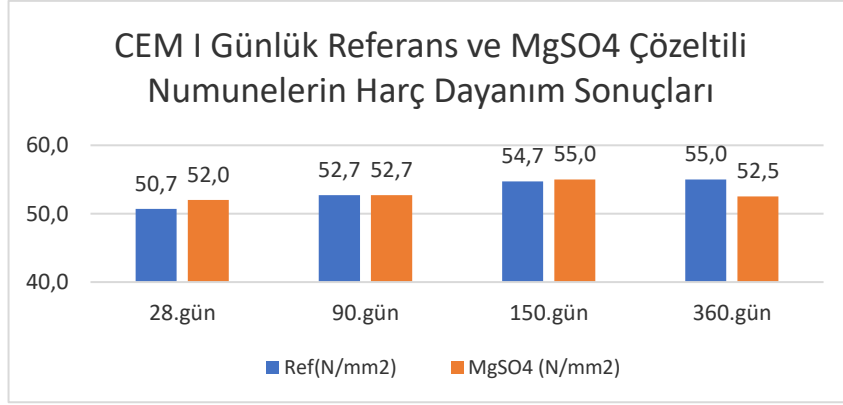
kristalli magnezyum silikat oluşumuna neden olur (Kuyumcu, 2006). Gelişen bu reaksiyonlar dayanım düşmesinin temel sebeplerini oluşturur.

CEM II/A tip çimentonun 360. gün sonundaki tüm kırım sonuçları Şekil 4.3.'de verilmiştir. Kırım sonuçlarına göre; standart kür uygulanan numuneler dayanım kazanmaya devam ederken, sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerde 150. güne kadar artış sonrasında 360. günün sonunda düşüş gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerin dayanım artışının durduğu ve hatta dayanımda düşüşlerin olduğu görülmüştür.



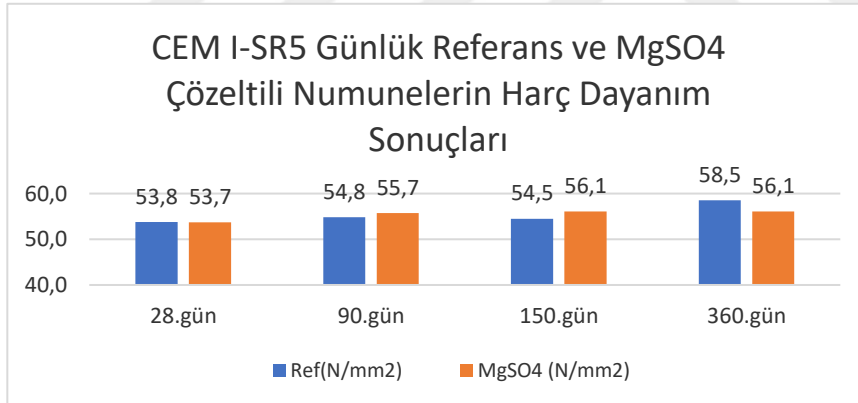
Şekil 4.3. CEM II/A Harç Dayanım Sonuçları

CEM I tip çimentonun 360. gün sonundaki tüm kırım sonuçları Şekil 4.4.'de verilmiştir. Kırım sonuçlarına göre; standart kür uygulanan kalıplar dayanım almaya devam ederken, sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerde 150. güne kadar artış sonrasında 360. günün sonunda düşüş gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerin dayanım artışının durduğu ve hatta gerilediği görülmüştür.



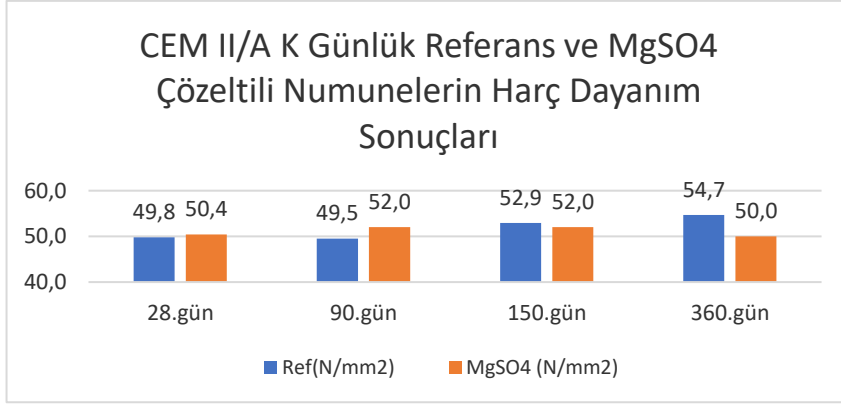
Şekil 4.4. CEM I Harç Dayanım Sonuçları

CEM I-SR5 tip çimentonun 360. gün sonundaki tüm kırım sonuçları Şekil 4.5.'te verilmiştir. Kırım sonuçlarına göre; standart kür uygulanan kalıplar dayanım almaya devam ederken, sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerde 150. güne kadar artış sonrasında 360. günün sonunda düşüş gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi içerisindeki kalıpların dayanım artışının durduğu ve hatta gerilediği görülmüştür.



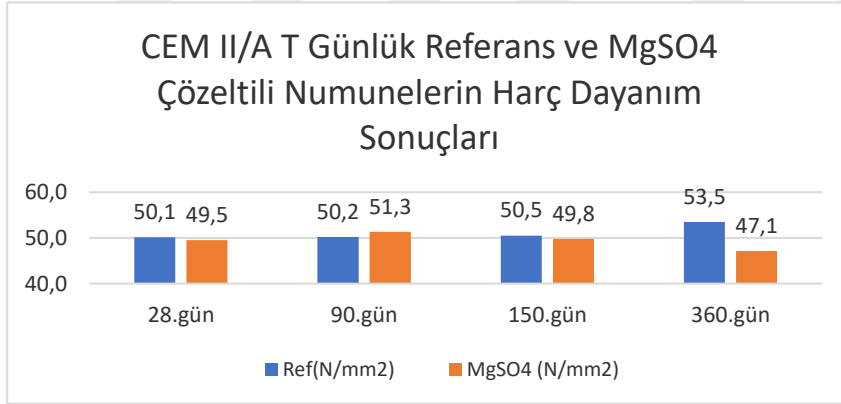
Şekil 4.5. CEM I-SR5 Harç Dayanım Sonuçları

CEM II/A K tip çimentonun 360. gün sonundaki tüm kırım sonuçları Şekil 4.6.'da verilmiştir. Kırım sonuçlarına göre; standart kür uygulanan kalıplar dayanım almaya devam ederken, sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerde 150. güne kadar artış sonrasında 360. günün sonunda dayanım artışının durduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. CEM II/A K Harç Dayanım Sonuçları

CEM II/A T tip çimentonun 360. gün sonundaki tüm kırım sonuçları Şekil 4.7.'de verilmiştir. Kırım sonuçlarına göre; standart kür uygulanan kalıplar dayanım almaya devam ederken, sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerde 90. güne kadar artış sonrasında düşüş gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi içerisindeki numunelerin dayanım artışının durduğu ve hatta gerilediği görülmüştür.

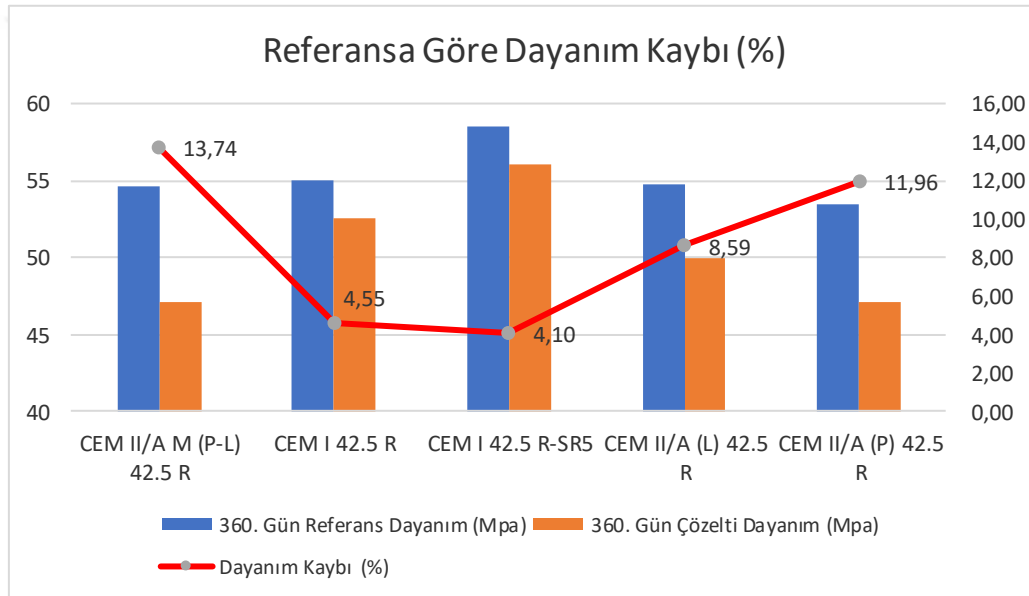


Şekil 4.7. CEM II/A T Harç Dayanım Sonuçları

360 gün sonunda hazırlanan bütün numuneler dayanım testine tabi tutulmuştur. Referans çimento ile magnezyum sülfat çözeltisinde kürlenendirilen numunelerin dayanım değerleri tespit edilmiştir. Referans numuneye göre 360 gün sonunda dayanım kayıpları % olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.5. ve Şekil 4.8'de çimento tiplerine göre dayanım kaybı yüzdelerini gösterilmiştir.

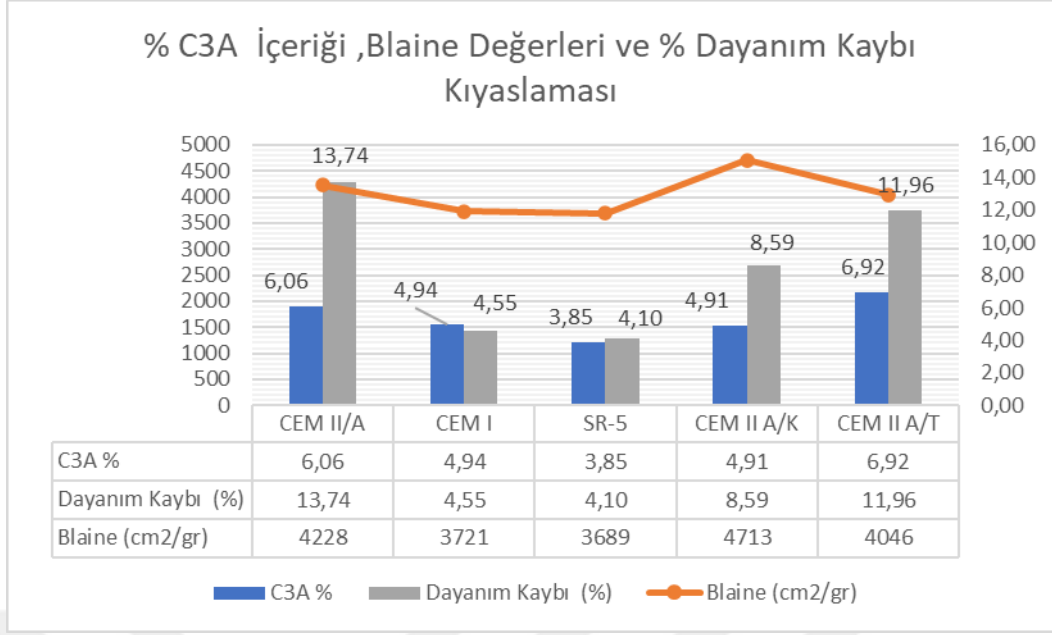
Çizelge 4.5. Çimento tiplerine göre dayanım kaybı yüzdeleri

| | 360. Gün Referans Dayanım (Mpa) | 360. Gün Çözelti Dayanım (Mpa) | Dayanım Kaybı (%) |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| CEM II/A M (P-L) 42.5 R | 54,6 | 47,1 | 13,74 |
| CEM I 42.5 R | 55 | 52,5 | 4,55 |
| CEM I 42.5 R-SR5 | 58,5 | 56,1 | 4,10 |
| CEM II/A (L) 42.5 R | 54,7 | 50,0 | 8,59 |
| CEM II/A (P) 42.5 R | 53,5 | 47,1 | 11,96 |



Şekil 4.8. 360. Gün Sonunda Çözelti İçindeki Harçların Referansa Göre % Dayanım Kaybı

Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler referansa göre: CEM II/A çimentosu %13,74, CEM I %4,55, CEMI-SR5 %4,10, CEM II/A K %8,59 ve CEM II/T %11,96 dayanım kaybı yaşamıştır. Sonuçların doğru yorumlanabilmesi sülfat etkisini azaltan etmenlerin incelenmesi gerekmektedir. Sülfat etkisinin azaltılmasında; geçirimsizlik, çimento tipi ve çimento C₃A içeriği, ince taneli puzolanik katkı miktarı önemli rol oynamaktadır (Kuyumcu, 2006). Şekil 4.9.'da çimento tiplerinin % C₃A içeriği, blaine değerleri ve dayanım kaybı kıyaslaması paylaşılmıştır.



Şekil 4.9. % C3A İçeriği ,Blaine Değerleri ve % Dayanım Kaybı Kıyaslaması Grafiği

Çalışmada kullanılan çimento tiplerinde temel olarak üç fark gözlemlenmektedir. İçeriklerindeki puzolanik katkı miktarları, yüzey alanları ve C₃A içerikleri, sülfat direncinde ve dayanım kaybının yorumlanmasında önemli veriler sunmaktadır. Sonuçlar ve öneriler bölümünde Şekil 4.9 detaylı bir şekilde incelenecektir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Harç numunelerin 28 gün normal kür suyunda kürlenmesi sonucu elde edilen basınç dayanım sonuçları irdelendiğinde, deneyde üretilip kullanılan bütün çimento tipleri aynı dayanım sınıfına yani 42,5 MPa dayanım sınıfına aittir. Ayrıca, üretilen bütün çimento tipleri 2 günlük dayanım değeri olan 20 MPa standart değerini sağlamıştır. Referans numunelerde 360 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde en düşük basınç dayanımının CEM II/A T (%78,56 klinker) çimentosu ile üretilmiş numunede, en yüksek basınç dayanımının ise SR-5 (%88,75 klinker) çimentosu ile üretilmiş numunede olduğu görülmektedir. CEM I ve CEM I-SR5 çimentolarındaki 360 günlük nihai dayanımın yüksek olması içeriklerindeki klinker miktarının yüksek ile açıklanabilir. Fakat, 360. yaş günü dayanımlar incelendiğinde CEM II/A K çimentosu ile üretilen numunenin klinker muhtevası %1,35 oranında CEM II/A T çimentosundan düşük olmasına rağmen 1,2 MPa daha yüksek tespit edilmiştir. Kalkerli çimentonun nihai dayanımının traslı çimentodan daha yüksek olmasının sebeplerinden biri blaine değerinin 667 cm²/gr yüksek olması olarak açıklanabilir. Şayet aynı incelikte öğütülmüş olsalardı farklı dayanım sınıfına ait çimentolar elde edilecekti. Çünkü klinkerin öğütülmüş olduğu incelik, başta priz süresi olmak üzere, hidrasyon ısısını ve dayanım özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Ağırlıkları aynı olan iki çimento numunesinde, daha ince tanelerden oluşan çimentonun diğerine göre çok sayıda tanesi bulunur. Böylelikle su ile temas edebilecek yüzey fazlaşmakta ve ince olarak öğütülmüş çimentolarda kimyasal reaksiyonlar daha hızlı gelişmesine ve dayanım değerinin artmasına neden olmaktadır (Erdoğan T, 1995). Ayrıca, deneyde kullanılan trasın puzolanik aktivitesi 5,7 MPa ve reaktif SiO₂ oranı %28,1 olarak tespit edilmiştir. Kullanılan tras TS 25 gerekliliklerini sağlamış olsa da içeriğindeki reaktif malzeme oranı düşüktür. Puzolanik reaksiyonların dayanıma olan etkisinin inceliğinin etkisinin gerisinde kaldığı söylenebilir. Bu durumda kalkerli çimentonun daha fazla yüzey alana sahip olması traslı çimentoya göre avantaj sağlamış ve boşlukların doldurulmasına pozitif etki yapmıştır. Ayrıca, kalkerin hidrate kalsiyum alüminat fazları ile daya iyi çalıştığı düşünülebilir.

Bütün referans numunelerde 360 gün boyunca dayanım artışı devam etmiştir. Standart kür şartları sağlandığında beton içerisindeki reaksiyonlar devam edecektir ve dayanımın sürekli artış göstermesi beklenen bir durumdur. 360 günlük referans numunesi dayanım sonuçları incelendiğinde, sıfır referans noktası dayanımlarına göre artış oranları sırasıyla CEM II/A 47 MPa'dan 54,6 MPa'ya %16,2, CEM I 46,0

MPa'dan 55,0 MPa'ya %19,6, CEM I SR-5 48,6 MPa'dan 58,5 MPa'ya %20,4, CEM II A/K 46,7 MPa'dan 54,7 MPa'ya %17,1 ve CEM II/T 45,1 MPa'dan 53,5 MPa'ya %18,6 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.2). Referansa göre traslı çimentonun, tras kalker karışımı kompoze çimentodan %2,4 oranında daha fazla dayanım kazanmasının sebebi CEM II/T çimentosunda bulunan %6,86 oranında daha fazla bulunan tras katkısı ile açıklanabilir (Çizelge 3.2). Puzolanların çimento ikame malzemesi olarak kullanılması durumunda, çimentonun hidrasyon ürünü olarak açığa çıkan Ca(OH)_2 ile sulu ortamda birleşmesinin betonda dayanım artışına neden olan bağların oluştuğu bilinmektedir (Fauzi vd., 2016). Bu süreç sistemdeki Ca(OH)_2 birikmesine bağlı olduğundan dolayı (Erdoğan vd., 2011), puzolan ikame edilmiş betonların dayanım kazanma hızı yavaşlar (Mehta, 1981; Massaza, 1974). Puzolan ikameli beton ve harçların kontrol numunesinin dayanımını yakalama hızları puzolanın tipine, inceliğine ve ikame miktarı gibi etmenlere bağlı olarak değişmektedir. Puzolan ikameli çimentolu sistemler ile, puzolan katkılı çimentolu sistemler arasında aynı davranış olmasa bile benzer dayanım davranışları görülmektedir (Erdoğan vd., 2011). Traslı çimentoda inceliğin artması durumunda dayanım kazanma hızının gelişeceğini ileri sürmüştür (Erdoğan, 1996). Dayanım sonuçları incelendiğinde traslı çimentonun (CEM II/T) kompoze çimentodan daha fazla dayanım kazanırken, kalkerli çimentodan (CEM II/A) daha az oranda dayanım kazanması puzolanik reaksiyonların dayanıma olan etkisinin inceliğin etkisinin gerisinde kalması olarak açıklanabilir.

Farklı çimentolardan üretilen harç numunelerin normal ve sülfat etkisi altında kürlenmesinin ardından 90. yaş gününün sonuna kadar yapılan basınç dayanımı testi sonucunda sülfat çözeltisinde bekletilen bütün numunelerde dayanım artışı gözlemlenmiştir. 90 gün gibi kısa sürelerde dayanım kaybı zaten beklenmeyen bir durumdur. Dahası, bu kadar kısa sürelerde etrenjit gibi yapıların henüz betona zarar verecek miktarda olmadığı, aksine normal kür suyunda kürlenmiş numunelere göre daha yüksek dayanım vermesi olağan bir durumdur. Bu durumu CEM II ve CEM I çimentosu ile üretilen numunelerin 90. yaş günü basınç dayanım sonuçları da desteklemektedir. (Su kürü numunelerinin dayanımının MgSO_4 kürüne maruz bırakılan numunelerden daha düşük çıkması). Sülfat etkisinin uzun süreler betona nüfuz etmesi sonucunda dayanım düşüşleri gözlemlenmiştir. 150 ve 360 günlük testler sonucunda dayanım düşüşleri gözlemlenmeye başlamıştır. 150 gün sonunda en yüksek dayanım kaybı yaşayan çimento türü CEM II A/T (50,5 MPa'dan 49,8 MPa'ya) olarak gerçekleşmiştir. Kalkerli çimento, uçucu küllü, yüksek fırın curufllu veya metakaolin ile tasarlanmış

betonun tomasit sülfat saldırısına dayanma kabiliyetine sahip olduğu anlaşılmış ve doğal puzolan ilavesi, betonun sülfat direncine yalnız sınırlı bir iyileşme sağlamıştır (A.Scarapoulou ve ark. 2012).

Bir yıl sonunda hazırlanan bütün kalıp numuneleri dayanım testine tabi tutulup, referans çimento ile magnezyum sülfat çözeltisinde kürlendirilen numunelerin dayanım değerleri tespit edildiğinde, referans numuneye göre 360 gün sonunda dayanım kayıpları CEM II/A çimentosunda 13,74%, CEM I 4,5%, CEMI-SR5 4,1%, CEM II/A K 8,6% ve CEM II/T 11,96% olarak gerçekleşmiştir. Sülfat etkisinin azaltılmasında; geçirimsizlik, çimento tipi ve çimento C₃A içeriği, ince taneli puzolanik katkı miktarı önemli rol oynadığı bilinmektedir. Sonuçlar incelendiğinde C₃A miktarı en düşük olan çimento tipinin (CEMI-SR5 %3,85) sülfat dayanımının en yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, daha önce tek başına sülfat dayanımında kullanılması pek tercih edilmeyen kalkerli çimentoların ince öğütülmeleri durumunda tras içeren çimentolara göre daha yüksek sülfat dayanımının olduğu sonucunu açığa çıkarmıştır. Test sonuçları incelendiğinde kalkerli çimentonun yüzey alanı (4713 cm²/gr), traslı (4046 cm²/gr) ve kompoze (4228 cm²/gr) çimentolara göre daha yüksektir ve daha ince öğütülmüştür. İnce tanelerden oluşan çimentonun diğerlerine göre çok sayıda tanesi olması ve daha fazla yüzey alana sahip geçirimsizliği artırmış ve sülfat direncine pozitif katkı sağlamıştır. Öte yandan traslı çimentodaki dayanım kaybının (%11,96), kompoze çimentodan daha az olması (%13,76) çimentoların içerisindeki puzolanların kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek yeni kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jelleri üretmesi böylece ortamdaki kalsiyum hidroksit konsantrasyonunun düşülmesi ve genleşmeye neden olan zararlı reaksiyonların azalması ile açıklanabilir. Kompoze çimentonun yüzey alanının traslı çimentodan 182 cm²/gr daha yüksek olmasına rağmen sülfat dayanımının düşük olması, kalkerli çimentoda olduğu gibi geçirimsizliğin kalkerli çimentodaki kadar sağlanamadığı ve traslı ve kompoze çimentoların kıyaslanmasında puzolanik reaksiyonların sülfat saldırısında daha etki rol oynadığı anlamına gelmektedir.

Sonuç olarak araştırma sırasında kullanılan tüm çimentolar incelendiğinde, sülfat direncine en yüksek etkiyi gösterenlerin sırasıyla C₃A içeriği yüksek olan çimentoların, sonrasında geçirimsizliği düşük olan çimentoların ve en son olarak puzolanik katkı içeren çimentoların olduğu söylemek mümkündür. Bu durumda ince öğütülmüş ve aynı dayanım sınıfına getirilmiş CEM II A/K çimentonun sülfat dayanımı için tercih edilebilecek bir çimento tipi olduğunu söylemek mümkündür.

Bir sonraki çalışmada incelik ve puzolanik katkı miktarı arasında bir korelasyon yapılması etki derecelerini ölçmek adına yapılabilecek bir çalışmadır. Çünkü yüksek yüzey alanına sahip kalkerli çimeto daha geçirimsiz ve daha dayanıklı iken, traslı ve kompoze çimentolar incelendiğinde yeteri kadar geçirimsizlik sağlanmadığında puzolanik etkinin sülfat dayanımında daha etkili olduğunu göstermektedir.

Ayrıca sonraki çalışmalarda, aynı yüzey alanına ve aynı katkı oranlarına sahip olan uçucu küllü, yüksek fırın cürufllu, metakaolinli, doğal puzolanlı ve kalkerli çimentoların sülfat testinin yapılması, kalkerli çimentonun kıyaslanması açısından önem arz etmektedir. Diğer katkıların birbirlerine olan üstünlüğünün anlaşılabilmesi için de böyle bir çalışma faydalı olacaktır.



KAYNAKLAR

A. Fauzi, M. F. Nuruddin, A. B. Malkawi, and M. M. A. B. Abdullah, "Study of Fly Ash Characterization as a Cementitious Material," *Procedia Eng.*, vol. 148, pp. 487–493, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROENG.2016.06.535.

Akalın T. ve ark., 2010, Beton Dökümünde ve Sonrasında Yaşanan Problemler ve Çözümler, Türkiye Hazır Beton Birliği

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*.

A.Scarapoulou ve ark., 2012, *Cement and Concrete Composites* 37 (2012), 267-275, Technical University of Athens

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.

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.

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 elik donatı korozyonuna etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

E. A. El-Alfi ve ark., 2003, Effect of limestone fillers and silica fume pozzolana on the characteristics of sulfate resistant cement pastes , National Research Center, Dokki, Cairo, Egypt 2003

Eren F., 2016, Polimer katkılı tamir harçlarının sülfat etkilerine dayanıklılığı, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Erdođdu K., Tokyay, M., Türker, P., “Traslar ve Traslı imentolar”, Türkiye imento Müstahsilleri Birliği, 2011

Erdođdu K., “Effects of Pozzolanic Additions on Grindability and Some Mechanical Properties of Pozzolanic Cements of Different Fineness Values”, Yüksek Lisans Tezi, 1996, Orta Dođu Teknik Üniversitesi, Ankara

Erdoğan T., “Betonu Oluřturan Malzemeler imentolar”, 1995, Orta Dođu Teknik Üniversitesi, Ankara

Florian M., Sulfate resistance of cement-reduced eco-friendly concretes, Cement & Concrete Composites 55 (2015) 364–373

Göktepe M., 2008, C3A oranı farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ilıca T., 2008, Farklı imentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimsizliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

İnan G. Sezer / Construction and Building Materials 26 (2012) 613–618, Civil Engineering Department, Ege University, 35100 _İzmir, Turkey

Kaplan H. Ve ark., 1995, Tras ve Traslı Çimentolar, Mühendislik Bilimleri Dergisi 1995 1 (2-3) 121-127

Kardeşler, A., 2005, Karışım suyunda bulunan magnezyum sülfat tuzunun uçucu küllü betonun özelliklerine etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

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.

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.

Lingling Hu, Z. He / Construction and Building Materials 262 (2020) 119847, Hubei (Wuhan) Institute of Explosion Science and Blasting Technology, Jiangnan University, Wuhan, Hubei 430056, China

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.

Massazza F., "Chemistry of Pozzolanic Additions and Mixed Cements", Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cements, Moscow, 1974, 10. K

Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Publishing.

Mehta P.K., “Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin Earth”.
Cement and Concrete Research, 1981, No. 4, pp 507-518

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.

Ö.Yeniay (11 Ekim 2022) sanalsantiye.com/betonda-sulfat-etkisi-sulfat-saldirisi-nedir/

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.

Rodriguez-Camacho ve ark. 2002, Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, Cement and Concrete Research 32 (2002) 1851–1858

Sergii Kroviakov 2019, Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive, 81-86.

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.

Şahin D.D. ve ark. 2022, Uçucu Kül İnceliğinin Betonun Sülfat Direnci Üzerine Etkisi, ADYU Mühendislik Bilimleri Dergisi 17 (2022) 287-303

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.

TS EN 197-1, 2012, Çimento-Bölüm, 1, 33-42.

Uygunoğlu, T., Yücel, K. T. ve Yurtçu, Ő., 2006, Betonun zararlı ortamlardaki durumu: Yeraltı suyu etkisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2 (1), 29-35.

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.

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.