T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# BORİK ASİT ÜRETİM ATIĞI OLAN BORJİPSİN YAPI SANAYİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

KÜBRA KUNT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. EMEK MÖRÖYDOR DERUN

İSTANBUL, 2016

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# BORİK ASİT ÜRETİM ATIĞI OLAN BORJİPSİN YAPI SANAYİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kübra KUNT tarafından hazırlanan tez çalışması 26.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Gamze GÜÇLÜ

İstanbul Üniversitesi _____

# ÖNSÖZ

"Borik Asit Üretim Atığı Olan Borjipsin Yapı Sanayinde Değerlendirilmesi" adlı yüksek lisans tez çalışmamda bilgisi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli tez danışmanım Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN'a,

Çalışmalarım boyunca gerekli malzeme ve cihazları kullanabilmeme olanak sağlayan, derin bilgisi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN'e,

Deneysel çalışmalarımı yürütmemdeki yardımlarından dolayı Türkiye Hazır Beton Birliği Kimya Laboratuvarı Müdürü Kimya Yüksek Mühendisi Eyüp EREN'e, Mekanik Laboratuvarı Müdürü İnşaat Yüksek Mühendisi Cenk KILINÇ'a ve laboratuvar çalışanlarına,

Deneysel çalışmalarımda kullandığım kimyasal katkıların temin edilmesindeki yardımlarından dolayı Basf Türk Kimya Sanayi'nden İnşaat Yüksek Mühendisi Emrah KARATAŞ'a,

Tez çalışmam boyunca karşılaştığım problemleri çözmemde tüm içtenliğiyle bana yardım eden, deneyleri ve analizleri yürütürken yardımını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, tezimin her aşamasında emeği bulunan Arş. Gör. Meral YILDIRIM'a ve tecrübelerini ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Seyhun KIPÇAK'a,

Tez çalışmamın her aşamasını birlikte geçirdiğim ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Fatma DUR ve Tuğçe ŞENBERBER'e,

Beni her zaman her konuda destekleyen çok sevdiğim aileme, arkadaşlarıma ve yaptığım çalışmalarda emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

Nisan, 2016

Kübra KUNT

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ ..... vii

KISALTMA LİSTESİ ..... viii

ŞEKİL LİSTESİ ..... ix

ÇİZELGE LİSTESİ ..... xi

ÖZET ..... xiii

ABSTRACT ..... xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ ..... 1

1.1 Literatür Özeti ..... 1
1.2 Tezin Amacı ..... 6
1.3 Hipotez ..... 6

BÖLÜM 2

BOR VE BORJİPS ..... 7

2.1 Bor ..... 7
2.2 Önemli Bor Mineralleri ..... 9
2.2.1 Tinkal ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) ..... 10
2.2.2 Kolemanit ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$) ..... 11
2.2.3 Üleksit ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$) ..... 11
2.3 Bor Minerallerinin Kullanım Alanları ..... 12
2.4 Borik Asit ve Üretim Yöntemleri ..... 15
2.4.1 Borik Asitin Üretim Yöntemleri ..... 17
2.4.1.1 Kolemanitten Borik Asit Üretimi ..... 17
2.4.1.2 Tinkalden Borik Asit Üretimi ..... 18
2.5 Borjips ..... 19

BÖLÜM 3

BETON VE ÇİMENTO ..... 20

3.1 Beton ..... 20
3.2 Beton Bileşenleri ..... 20
3.2.1 Agrega ..... 20
3.2.2 Çimento ..... 21
3.2.2.1 Çimento Hammaddeleri ..... 22
3.2.2.2 Çimento Üretimi ..... 23
3.2.2.3 Çimento Özellikleri ..... 27
3.2.2.4 Çimento Çeşitleri ..... 31
3.2.3 Su ..... 34
3.2.4 Kimyasal Katkılar ..... 35
3.2.4.1 Hava Sürükleyici Katkılar ..... 35
3.2.4.2 Süper Akışkanlaştırıcı Katkılar ..... 36
3.2.4.3 Priz Hızlandırıcı/Geciktirici Katkılar ..... 36
3.2.4.4 Su Geçirimsizlik Katkıları ..... 37
3.3 Betonların Sınıflandırılması ..... 37
3.4 Betonun Özellikleri ..... 40
3.4.1 İşlenebilirlik ..... 40
3.4.2 Mukavemet ..... 40
3.4.3 Sünme ..... 41
3.4.4 Rötre ..... 41
3.4.5 Termal Özellikler ..... 41
3.5 $MgSO_4$ Durabilitesi ..... 42

BÖLÜM 4

DENEYSEL YÖNTEM ..... 44

4.1 Hammaddelerin Temini ve Karakterizasyonu ..... 44
4.2 Agrega Deneyleri ..... 47
4.2.1 Tane Yoğunluğu Tayini ..... 47
4.2.2 Özgül Yüzey Alanı Tayini ..... 48
4.2.3 Kızdırma Kaybı Tayini ..... 49
4.2.4 Su Emme Oranı Tayini ..... 49
4.2.5 Boyut Analizi ..... 49
4.2.6 Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği ..... 50
4.2.7 Suda Çözünebilir Klorür İçeriği ..... 51
4.2.8 Toplam Kükürt İçeriği ..... 52
4.3 Çimento Harçlarının Hazırlanması ..... 53
4.4 Çimento Harçlarına Uygulanan Deneyler ..... 57
4.4.1 Yayılma Tablası Deneyi ..... 57
4.4.2 Birim Ağırlık Deneyi ..... 58
4.4.3 Priz Deneyleri ..... 59
4.5 Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri ..... 59
4.6 Su Emme Deneyi ..... 60
4.7 $MgSO_4$ Durabilite Deneyleri ..... 60

4.8 XRD Analizleri ..... 61

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR ..... 62

5.1 Hammaddelerin Karakterizasyon Sonuçları ..... 62
5.2 Agrega Deneyleri Sonuçları ..... 67
5.2.1 Tane Yoğunluğu Tayini Sonuçları ..... 67
5.2.2 Özgül Yüzey Alanı Tayini Sonuçları ..... 68
5.2.3 Kızdırma Kaybı Tayini Sonuçları ..... 68
5.2.4 Su Emme Oranı Tayini Sonuçları ..... 68
5.2.5 Boyut Analizi Deneyi Sonuçları ..... 69
5.2.6 Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği Analizi Sonuçları ..... 70
5.2.7 Suda Çözünebilir Klorür İçeriği Analizi Sonuçları ..... 70
5.2.8 Toplam Kükürt İçeriği Analizi Sonuçları ..... 70
5.3 Çimento Harçlarına Uygulanan Deneylerin Sonuçları ..... 71
5.3.1 Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları ..... 71
5.3.2 Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları ..... 73
5.3.3 Priz Deneyleri Sonuçları ..... 74
5.4 Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları ..... 76
5.5 Su Emme Deneyi Sonuçları ..... 79
5.6 $MgSO_4$ Durabilite Deneyleri Sonuçları ..... 80
5.7 XRD Analizi Sonuçları ..... 81

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 87

KAYNAKLAR ..... 90

ÖZGEÇMİŞ ..... 95

## SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| Å | Angström |
| $D_{max}$ | Maksimum agrega tanecik çapı |
| GPa | Giga Pascal |
| K | Kelvin |
| kV | Kilo Volt |
| MPa | Mega Pascal |
| µm | Mikro Metre |
| mA | Mili Amper |
| s | Saat |
| W | Watt |

## KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| DTA-TG | Diferansiyel Termal Analiz-Termogravimetrik Analiz |
| FT-IR | Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektroskopisi |
| ICP-OES | İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi |
| pdf | XRD mineral kodu (Powder Diffraction File) |
| PVC | Polivinilklorür |
| SEM | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| TS | Türk Standartları |
| XRD | X-Işını Kırınımı |
| XRF | X-Işını Floresans Spektroskopisi |

# ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa


Şekil 2.1 Tinkal ... 11
Şekil 2.2 Kolemanit ... 11
Şekil 2.3 Üleksit ... 12
Şekil 2.4 Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı ... 12
Şekil 2.5 Kolemanitten borik asit üretimi proses şeması ... 18
Şekil 2.6 Borjips ... 19
Şekil 3.1 Çimento üretim prosesi ... 24
Şekil 3.2 Klinker oluşumu sırasında hammaddelerdeki faz değişimleri ... 27
Şekil 3.3 Hidratasyon süreçleri ... 28
Şekil 3.4 Mineral katkıların kimyasal bileşimi ... 34
Şekil 4.1 Retsch agat havan ... 44
Şekil 4.2 Borjipsin öğütme öncesi ve sonrası ... 44
Şekil 4.3 Klinker ... 45
Şekil 4.4 X-ışını kırınım cihazı (XRD) ... 45
Şekil 4.5 Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi cihazı (FT-IR) ... 46
Şekil 4.6 X-Işını floresans spektrometresi (XRF) ... 46
Şekil 4.7 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ... 47
Şekil 4.8 Le Chatelier balonu ... 48
Şekil 4.9 Blaine metodu deney aleti ... 48
Şekil 4.10 Elek sarsma makinesi ... 50
Şekil 4.11 Çimento mikseri ... 55
Şekil 4.12 Sarsma tablası ... 56
Şekil 4.13 Nem kabini ... 56
Şekil 4.14 Kalıptan çıkarılan numuneler ... 57
Şekil 4.15 Kür havuzu ... 57
Şekil 4.16 Çimento yayılma tablası ... 58
Şekil 4.17 Yayılma deneyi öncesi ve sonrası ... 58
Şekil 4.18 Vikat aleti ... 59
Şekil 4.19 Basınç ve eğilme dayanımı cihazı ... 60
Şekil 4.20 $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde kürlenen numuneler ... 61
Şekil 5.1 Hammaddelere ait XRD paternleri ... 63
Şekil 5.2 Borjipsin FT-IR spektrumu ... 63

Şekil 5.3 Borjipsin XRF grafiği ..... 64
Şekil 5.4 Klinkerin XRF grafiği ..... 64
Şekil 5.5 Kuma ait XRF grafiği ..... 65
Şekil 5.6 Borjipse ait DTA-TG grafiği ..... 66
Şekil 5.7 Borjipse ait SEM görüntüsü (×250 büyütme) ..... 67
Şekil 5.8 Borjipse ait granülometri eğrisi ..... 69
Şekil 5.9 Klinkerin granülometri eğrisi ..... 69
Şekil 5.10 Kuma ait granülometri eğrisi ..... 70
Şekil 5.11 Su/binder oranı 0.50 olan karışımlara ait XRD paternleri ..... 81
Şekil 5.12 Su/binder oranı 0.45 olan karışımlara ait XRD paternleri ..... 83
Şekil 5.13 Su/binder oranı 0.40 olan karışımlara ait XRD paternleri ..... 84
Şekil 5.14 $MgSO_4$ durabilitesi deney numuneleri XRD sonuçları ..... 85

# ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa


Çizelge 2.1 Bor elementinin atomik yapısı ..... 8
Çizelge 2.2 Bor elementinin fiziksel özellikleri ..... 9
Çizelge 2.3 Bor mineralleri..... 10
Çizelge 2.4 Borik asitin özellikleri ..... 15
Çizelge 3.1 Portland çimentosunu oluşturan oksitler ..... 25
Çizelge 3.2 Portland çimentosunun ana bileşenleri ..... 26
Çizelge 3.3 Genel çimentolar sınıfına ait 27 çimento ..... 32
Çizelge 3.4 Birim hacim kütlesine göre beton sınıfları ..... 37
Çizelge 3.5 Beton sınıfları ve dayanımları..... 38
Çizelge 3.6 Dayanımlarına göre beton sınıfları..... 38
Çizelge 3.7 Çökme sınıfları..... 39
Çizelge 3.8 Yayılma sınıfları ..... 39
Çizelge 3.9 Maksimum agrega tane boyutuna göre beton sınıfları ..... 39
Çizelge 4.1 Hazırlanan çimento harçları ..... 53
Çizelge 4.2 Katkı kullanılarak hazırlanan karışımlar..... 54
Çizelge 5.1 Hammaddelerin XRD sonuçları ..... 62
Çizelge 5.2 Borjipsin XRF analizi sonuçları..... 64
Çizelge 5.3 Klinkere ait XRF analizi sonuçları..... 65
Çizelge 5.4 Kuma ait XRF analizi sonuçları..... 65
Çizelge 5.5 Yoğunluk deneyi sonuçları ..... 67
Çizelge 5.6 Özgül yüzey alanı tayini sonuçları ..... 68
Çizelge 5.7 Kızdırma kaybı tayini sonuçları..... 68
Çizelge 5.8 Yayılma tablası deneyi sonuçları ..... 71
Çizelge 5.9 Katkılı karışımlara ait yayılma tablası deneyi sonuçları..... 72
Çizelge 5.10 Katkı içermeyen karışımlara ait birim ağırlık deneyi sonuçları ..... 73
Çizelge 5.11 Katkılı karışımlara ait birim ağırlık deneyi sonuçları ..... 74
Çizelge 5.12 Katkı içermeyen karışımların priz sonuçları ..... 75
Çizelge 5.13 Katkılı karışımlara ait priz sonuçları..... 76
Çizelge 5.14 Katkı içermeyen karışımların eğilme ve basınç dayanımı sonuçları..... 77
Çizelge 5.15 Katkılı karışımlara ait eğilme ve basınç dayanımı sonuçları ..... 78
Çizelge 5.16 Katkısız karışımlara ait su emme deneyi sonuçları..... 79
Çizelge 5.17 Katkılı karışımlara ait su emme deneyi sonuçları..... 80
Çizelge 5.18 $MgSO_4$ durabilitesi deney sonuçları ..... 81
Çizelge 5.19 Su/binder oranı 0.50 olan karışımların XRD sonuçları ..... 82
Çizelge 5.20 Su/binder oranı 0.45 olan karışımların XRD sonuçları ..... 83

Çizelge 5.21 Su/binder oranı 0.40 olan karışımların XRD sonuçları ..... 84
Çizelge 5.22 $MgSO_4$ durabilitesi deney numuneleri XRD sonuçları..... 85

# ÖZET

## BORİK ASİT ÜRETİM ATIĞI OLAN BORJİPSİN YAPI SANAYİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kübra KUNT

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Ülkemiz Dünya bor rezervinin %72.1'ine sahiptir. En önemli bor mineralleri diğer bor ürünlerinin ve boratların üretiminde hammadde olarak kullanılmaları nedeniyle kolemanit, üleksit ve boraks mineralleridir. Bu mineraller kullanılarak diğer ürünlerin üretildiği proseslerde bor içeren atıklar oluşmaktadır. Üretim tesislerinin yakınlarındaki atık havuzlarında depolanan bu atıklar çevre kirliliğine yol açmaktadırlar. Ayrıca oluşan atıkların depolanması ekonomik açıdan da problem oluşturmaktadır. Bu nedenle atıkların değerlendirilmesi ekolojik ve ekonomik açıdan oldukça önemlidir.

Borjips, borik asit üretimi sırasında kolemanit ve sülfürik asitin reaksiyonu sonucunda oluşan ve bor içeren bir atıktır. Oluşan bu atığın çimento üretiminde değerlendirilmesi, çimento üretim maliyetinin azaltılması, toprak ve yeraltı sularının kirlenmesinin önlenmesi açısından önemlidir.

Yapılan yüksek lisans tez çalışmasında klinker ve borjips kullanılarak farklı oranlarda borjips içeren (%0, 1, 3, 5, 7 ve 10) ve farklı su/binder oranlarında (0.50, 0.45 ve 0.40) çimento harçları hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlara yayılma tablası, birim ağırlık, priz süresi deneyleri uygulanmıştır. Borjips ilavesinin eğilme ve basınç dayanımı, su emme gibi özelliklere etkisi incelenmiştir. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. En yüksek dayanımın elde edildiği borjips oranı belirlenerek, belirlenen oranda hava sürükleyici, priz hızlandırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmıştır. Ayrıca en yüksek dayanımın elde edildiği karışımın $MgSO_4$ durabilitesini belirlemek amacıyla 15, 30 ve 45 gün boyunca $MgSO_4$ çözeltisinde

kürlenen numunelerin kütle değişimleri ile eğilme ve basınç dayanımları eşit süre suda kürlenen numunelerle karşılaştırılmıştır. Hazırlanan tüm numunelerin karakterizasyonu XRD ile yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Borjips, klinker, çimento harcı, kimyasal katkılar, basınç ve eğilme dayanımı, $MgSO_4$ durabilitesi, XRD.

## ABSTRACT

# UTILIZATION OF BORIC ACID PRODUCTION WASTE OF BOROGYPSUM IN CONSTRUCTION INDUSTRY

Kübra KUNT

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Turkey has the 72.1% of the world boron reserves. The most important boron minerals are the colemanite, ulexite and borax because they are used as raw material for the production of the other boron products and borates. During the production processes of these materials, boron containing wastes produce and these wastes stored in the waste pools of the plant cause environmental pollution. Also, these stored wastes cause economical problems. Therefore, evaluation of these wastes is very important in terms of ecological and economical reasons.

Borogypsum is one of the boron containing wastes produced from the reaction of the colemanite and sulphuric acid during boric acid production. Evaluation of this waste in the cement production is important because of reduction in production cost and prevention of soil and groundwater pollution.

In this study, clinker and borogypsum were used in the production of cement mortars that have different borogypsum ratios (0, 1, 3, 5, 7 and 10%) and different water/binder ratios (0.50, 0.45 and 0.40). Flow table, unit volume and setting time experiments were applied to the prepared mortars. Also, effect of the addition of borogypsum to properties like flexural and compressive strength and water absorption were investigated. 3, 7 and 28 days flexural and compressive strengths of the samples were measured and the ratio that provides highest strength is determined. After

determination, air entraining, setting accelerating and super plasticizer admixtures were used at this ratio. Moreover, for this ratio, $MgSO_4$ durability was tested with comparing mass changes and flexural and compressive strengths of samples cured in $MgSO_4$ solution and water for 15, 30 and 45 days. X-ray diffraction (XRD) analysis was realized for characterization of the chemical structure of 28-days mortars.

**Keywords:** Borogypsum, clinker, cement mortar, chemical admixtures, compressive and flexural strength, $MgSO_4$ durability, XRD.

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

## 1.1 Literatür Özeti

Türkiye 955,297,000 ton $B_2O_3$ içeren rezerviyle Dünya bor rezervinin %72.1'ine sahiptir. Doğada serbest halde bulunmayan bor mineralinin 230'dan fazla türü bulunmaktadır. Bor minerallerinin en önemli olanları tinkal, kolemanit ve üleksittir. Bu mineraller borik asit üretiminde ve diğer uç ürün (konsantre tinkal, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, susuz boraks, sodyum perborat) ve boratların üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadırlar. Bor mineralinin saf olarak elde edilmesinde ve diğer uç ürün ve boratların elde edilmesinde gelişmiş prosesler uygulanmaktadır. Bu proseslerin uygulanması sırasında bazı endüstriyel atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar fabrika yakınındaki atık havuzlarında depolanırlar ve doğada kendiliğinden dönüşemedikleri için çevre kirliliğine neden olurlar. Bu atıkların endüstride çimento ve beton üretiminde kullanılması çevre kirliliğini önlemek açısından önemli olduğu gibi çimento ve klinker gibi diğer hammaddelerin gerektiğinden daha az kullanılması da maliyetin azaltılması ve enerji tasarrufu açısından önemlidir [1-3].

Literatürde çeşitli bor atıklarının çimento ve beton katkı maddesi olarak kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmında bor atıkları tek başına katkı maddesi olarak kullanılmış, bazılarında ise farklı atıklarla birlikte çimento ve beton üretiminde kullanılmışlardır.

Erdoğan vd. [4] yaptıkları çalışmada kolemanit atığı, asidik tüf ve Portland çimentosu kullanarak ürettikleri hafif beton numunelerinin işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini incelemişlerdir. %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında kolemanit atığı kullanarak hazırladıkları

harçlara çökme, hava içeriği, yoğunluk ve tek eksenli basınç dayanımı testlerini uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçları atık kullanmadan ürettikleri kontrol numunesi ve Türk Standartları değerleri ile karşılaştırmışlardır. Beton numunelerine kolemanit atığı ilavesinin işlenebilirliğe büyük bir etkisinin olmadığı, ancak dayanımı azaltıcı yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Erdoğmuş [5], kolemanit atığı ve silis dumanının çimento harcı üzerindeki etkilerini incelemek üzere yaptığı çalışmada priz başlangıç ve bitiş süreleri, özgül ağırlık, su ihtiyacı, akışkanlık, hacim genişlemesi, basınç dayanımı, donmaya ve çözülmeye karşı direncin tayini testlerini uygulamıştır. Silis dumanı oranının %6 olarak sabit tuttuğu çalışmada %2, 4, 6, 8, 10 ve 12 oranlarında kolemanit atığı kullanmıştır. Silis dumanı ve kolemanit atığının priz başlangıç ve bitiş sürelerini geciktirdiği, su ihtiyacını arttırdığı, özgül ağırlığı düşürdüğü ve erken dayanımı azalttığı sonucuna varmıştır.

Erdoğmuş vd. [6] Portland çimentosu ve farklı oranlarda yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve kolemanit atığı kullanarak hazırladıkları harçlara basınç dayanımı, priz süreleri, özgül ağırlık, özgül yüzey alanı ve sülfat direnci testlerini uygulamışlardır. Kolemanit atığının çimento pastasının priz başlangıç ve bitiş sürelerini uzattığını, erken dayanımını azalttığını, sülfat genişlemesini arttırdığını belirlemişlerdir.

Gencel vd. [7] yaptıkları çalışmada kolemanit ilavesinin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çökme, hava içeriği, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, Schmidt sertliği, elastiklik modülü, donmaya ve çözülmeye karşı direncin tayini, birim ağırlık ve ultrases hızı ile ölçüm testleri uygulamışlardır. Kolemanitin %10-50 aralığında beton agregası olarak kullanılmasının betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini negatif olarak etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. %30'a kadar kolemanit ilavesinin betonun işlenebilirliği ve dayanımı açısından kabul edilebilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Alp vd. [8] arsenik içeren borjipsin çimentoya etkilerini incelemek üzere yaptıkları çalışmalarında %3-8 oranlarında arsenik içeren borjips ve doğal jips kullanmışlardır. Borjipsin çimentonun dayanım ve priz sürelerine etkisini incelemişlerdir. Ayrıca ürettikleri harçların içeriğindeki bazı maddelerin çözünülürlüğünü incelemek üzere liç testi uygulamışlardır. Arsenik içeren borjipsin priz geciktirici olduğu ve %3-6

oranlarında kullanıldığında Portland çimentosuyla hazırlanan harçlardan daha yüksek dayanıma sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları liç testinin sonucunda ise arsenik içeren borjipsin tehlikeli atık sınıfına girmediği sonucuna ulaşmışlardır.

Targan vd. [9] yaptıkları çalışmada doğal puzolan, kolemanit atığı, uçucu kül ve taban külü ilavesinin çimento ve beton üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kolemanit atığı, uçucu kül ve taban külü oranlarını sabit tutmuşlardır ve sırasıyla %4, %10 ve %10 şeklinde belirlemişlerdir. Doğal puzolan oranını ise %5-30 arasında değiştirmişlerdir. Hazırladıkları karışımların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, hacim genleşmesi ve priz süresi gibi özelliklerini belirlemişlerdir. Kolemanit atığı ilavesinin priz süresini oldukça geciktirdiği, 28 günlük kür süresinde dayanımı önemli şekilde arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Targan vd. [10] bentonit, kolemanit atığı, uçucu kül ve taban külü kullanarak yaptıkları çalışmada hazırladıkları karışımların priz süresi, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, hacim genleşmesi ve su ihtiyacı gibi özelliklerini belirlemişlerdir. Kolemanit atığı, uçucu kül ve taban külü oranlarını sabit tutmuşlardır ve sırasıyla %4, %10 ve %10 şeklinde belirlemişlerdir. Bentonit oranını ise %5-30 arasında değiştirmişlerdir. Bentonit ve kolemanit atığının birlikte kullanıldığı karışımların erken dayanımı oldukça düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır. Kolemanit atığının kullanılmasının çimento pastasının genleşmesini önemli ölçüde etkilemediğini, priz süresini uzattığını belirtmişlerdir.

Erdoğan vd. [11] yaptıkları çalışmada Portland ve tras çimentosuna %1, 3, 5 ve 7 oranlarında kolemanit atığı eklemişlerdir. Hazırladıkları karışımlara priz süresi, hacim genleşmesi, eğilme ve basınç dayanımı testlerini uygulamışlardır. Sonuç olarak kolemanit atığının %5'e kadar çimento katkısı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Sevim ve Tümen [12] yaptıkları çalışmada %0, 3, 5, 10 ve 15 oranında borjips ilave ettikleri betonun priz süresi, hacim genleşmesi, birim ağırlık, kıvam, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı gibi özelliklerini test etmişlerdir. Borjips ilavesinin kıvamı azalttığını, priz süresini geciktirdiğini, Portland çimentosundan daha az veya Portland çimentosuna eşit hacim genleşmesi gösterdiğini, birim ağırlığı önemli ölçüde etkilemediğini belirlemişlerdir. %3 ve %5 borjips içeren beton karışımlarının referans karışımdan daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Korçak [13] yaptığı çalışmada klinkere %3, 5, 7 ve 10 oranlarında kolemanit atığı ilave ederek çimentoda incelik tayini, özgül ağırlık ve özgül yüzey tayini, hacim genleşmesi, kıvam suyu, priz süresi ve dayanım testlerini uygulamıştır. Kolemanit atığı ilavesinin hacim genleşmesi üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığını, çimentonun kıvam değerini arttırdığını, yani standart kıvam için daha fazla suya ihtiyaç duyulduğunu, priz başlangıç ve bitiş sürelerini geciktirdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca %5 ve %7 kolemanit atığı içeren numunelerinde Portland çimentosu ile hazırlanan referans numuneye yakın dayanım sonuçları gösterdiğini belirlemiştir.

Öntürk [14] Portland çimentosuna kütlece %0, 3, 5, 10 ve 15 oranlarında borjips ilave ederek hazırladığı karışımlara karbonatlaşma tayini, aşınma miktarı tayini, kapilarite deneyi, su emme tayini, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, rötre miktarı tayini, yayılma tablası deneyi uygulamıştır. Su/bağlayıcı oranını 0.50 olarak belirlemiştir. Borjips ilavesinin numunelerin kıvamını azalttığını, %3 ve %5 borjips içeren numunelerin basınç dayanımlarının referans numuneden daha yüksek olduğunu ve aşınmayı azalttığını, %5'e kadar olan borjips ilavesinin karbonatlaşmayı azalttığını belirlemiştir.

Tümen [15] Portland çimentosuna kütlece %0, 3, 5, 10 ve 15 oranlarında borjips ilave ederek 0.50 ve 0.60 su/bağlayıcı oranlarında deneylerini yürütmüştür. Hazırladığı numunelere çimento hamuru, taze beton ve sertleşmiş beton deneylerini uygulayarak borjips ilavesinin etkilerini incelemiştir. Borjips ilavesinin normal kıvam için gerekli su miktarını arttırdığını, priz sürelerini uzattığını, işlenebilirliği azalttığını, yoğunluk üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirlemiştir.

Aydın [16] kolemanit atığının beton üzerindeki etkisini incelemek üzere çimento yerine %0, 3, 5, 10 ve 15 oranlarında kolemanit atığı kullanarak yürüttüğü çalışmalarında su/bağlayıcı oranını 0.60 ve 0.50 olarak belirlemiştir. Hazırladığı beton karışımlarına çökme hunisi deneyi, Ve-Be deneyi, basınç dayanımı, silindir yarma deneyi, ses hızı ölçümü ve Schmidt çekici ile basınç dayanımının belirlenmesi deneylerini uygulamıştır. Kolemanit atığı katkısının taze betonun işlenebilirliğini azalttığını, 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip karışımların basınç dayanımlarının, 0.60 su/bağlayıcı oranına sahip karışımlardan daha yüksek olduklarını belirlemiştir.

Yaltay [17] kolemanit katkılı çimento ve agrega olarak pomza kullanarak hafif beton üretmiştir. Kolemanit katkısını %0, 0.4, 0.6, 0.8, 1 ve 2 oranlarında kullanmıştır. Beton numunelerinin gama radyasyon soğurganlıklarını incelediği çalışmasında numunelere ayrıca porozite, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı deneylerini de uygulamıştır. Kolemanit katkısının ileri kür yaşlarında basınç dayanımını arttırdığını, betonların yüksek sıcaklık altındaki davranışlarını fazla etkilemediğini, radyasyon soğurma konusunda önemli katkısının olduğunu belirlemiştir.

Sevim [2] yaptığı çalışmada hazırlamış olduğu kolemanit atığı içeren beton numunelerine basınç ve silindir yarmada çekme dayanımı testlerini uygulamıştır. Ayrıca numunelerin kuruma rötrelerini de ölçmüştür. Su/bağlayıcı oranını 0.50 olarak seçtiği çalışmasında %0, 3, 5, 10 ve 15 oranlarında atık kullanarak karışımlarını hazırlamıştır. %3 ve 5 atık içeren numunelerin dayanım sonuçlarının referans karışımdan daha yüksek olduğunu ve kolemanit atığı ilavesinin referans karışıma göre kuruma rötresini %37'ye kadar azalttığını belirlemiştir.

Özmal [18] yaptığı çalışmasında alünit mineraline farklı oranlarda kolemanit atığı, tinkal atığı, uçucu kül ve taban külü ekleyerek hazırladığı çimento karışımlarına özgül ağırlık, priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı deneylerini uygulamıştır. Kullanılan katkı miktarının artmasıyla çimentonun özgül ağırlığının azaldığını, kolemanit atığının klinkere %1 ve 3 oranlarında katıldığı çimentoların priz sürelerinin Türk Standart değerlerine uyduğunu belirlemiştir.

Eyyüboğlu [19] çalışmasında farklı oranlarda $B_2O_3$ içeren kolemanit atığı kullanarak farklı çimentolar hazırlamıştır. %1, 3, 5 ve 10 atık içeren çimentolara hacim genleşmesi, basınç dayanımı, çekme dayanımı, priz süreleri, yüksek sıcaklık, donma-çözülme deneylerini uygulamıştır. Hacim genleşmesi değerlerinin standartlara uygun olduğunu, %10 atık içeren numuneler haricindeki numunelerin erken dayanımlarının referans karışımdan daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Altınköprü [20] çalışmasında Portland çimentosu klinkerine sabit oranda alçıtaşı veya borjips ekleyerek hazırladığı karışıma %0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9 oranlarında prina atığı ve %2, 4, 6, 8 oranlarında kolemanit konsantratör atığı ekleyerek farklı çimento

karışımları hazırlamıştır. Bu karışımlara kıvam suyu, özgül yüzey alanı, priz süresi, genleşme miktarı ve basınç dayanımı deneylerini uygulamıştır. Çimento karışımlarının içerdiği atık oranı arttıkça kıvam suyu miktarının arttığını, priz sürelerinin uzadığını, artan prina oranlarıyla dayanımın arttığını ancak katkılı karışımların dayanımlarının referans karışımdan daha düşük olduğunu belirlemiştir.

## 1.2 Tezin Amacı

Yapılan çalışmada borik asit üretimi prosesi sırasında ortaya çıkan borjips atığının çimento üretiminde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda borjips içeren ve farklı su/binder oranına sahip çimento harçları hazırlanarak özellikleri incelenmiştir. En iyi dayanımın elde edildiği borjips oranı belirlenerek farklı katkı maddeleri kullanılmıştır ve kullanılan katkı maddelerinin çimento harçlarının özelliklerine etkileri incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda en iyi dayanım özelliklerini gösteren ve optimum fiziksel özelliklere sahip çimento harcı karışımının bileşiminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 1.3 Hipotez

Yapılan yüksek lisans tezi ile borik asit üretimi sırasında açığa çıkan borjips atığının çimento üretiminde değerlendirilmesi sonucunda çimento üretim maliyeti azaltılmış olacaktır. Ayrıca fabrika yakınlarındaki atık havuzlarında biriktirilen atığın kullanılmasıyla toprak ve su altı kaynaklarının kirlenmesinin önlenmesi ile ekolojik olarak da katkı sağlanmış olacaktır. Tüm bu ekonomik ve ekolojik katkıların yanında optimum borjips katkısı ile çimento özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

# BÖLÜM 2

# BOR VE BORJİPS

## 2.1 Bor

Bor, periyodik tabloda "B" simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, mol ağırlığı 10.811 g/mol olan, yarı metal özellik gösteren, yarı iletken özelliğe sahip elementtir. Periyodik tabloda 3A grubunun ilk ve en hafif elementidir. Bor elementinin temel hal elektron dizilimi $1s^2\ 2s^2 2p^1$'dir.

Bor elementi $^{8}B$, $^{10}B$, $^{11}B$, $^{12}B$, $^{13}B$ izotoplarından meydana gelmektedir ve en kararlı izotopları $^{10}B$ ve $^{11}B$'dir. Bu izotopların doğada bulunma oranları sırasıyla %19.1-20.3 ve %79.7-80.9'dir. $^{10}B$ izotopunun çok yüksek termal nötron tutma özelliğe sahip olması bu izotopun nükleer malzemelerin üretilmesinde ve nükleer enerji santrallerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Türkiye, $^{10}B$ izotop oranı açısından zengin bor cevher yataklarına sahiptir.

Bor elementinin çeşitli metal ve ametal elementlerle oluşturduğu bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, bor içeren bileşiklerin birçok farklı endüstride kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor elementi, bileşiklerinde metal dışı bileşiklere benzer özellikler göstermesine rağmen, saf bor, karbon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor, görünümü ve optik özellikleri açısından elmasa benzemektedir ve elmas kadar serttir.

Bor mineralinin saf elementi ilk olarak, 1808 yılında İngiliz kimyager Humphry Davy ile Fransız kimyager Joseph Louis Gay-Lussac ve Baron Louis Jacques Thenard tarafından elde edilmiştir.

Bor elementi doğada amorf veya kristalin polimorf olarak çeşitli allotropik formlarda bulunmaktadır. Alfa ($\alpha$) ve beta ($\beta$) rombohedral formlar bor elementinin üzerinde en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır.

Doğada yaklaşık 230 farklı çeşidi bulunan bor minerali, hiçbir zaman saf olarak bulunmamaktadır. Sanayide alkali ve toprak alkali bor mineralleri olan tinkal ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), kernit ($Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$), kolemanit ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$) ve üleksit ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$) kullanılmaktadır. Ticari bor maden yatakları sınırlı olmakla birlikte en çok Türkiye ve ABD'de bulunmaktadırlar. Bor elementinin atomik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bor elementinin atomik yapısı [21]

| | |
|---|---|
| Atomik Çapı (Å) | 1.17 |
| Atomik Hacmi ($cm^3$/mol) | 4.6 |
| Kristal Yapısı | Rombohedral |
| Elektron Dizilimi | $1s^2\ 2s^2\ p^1$ |
| İyonik Çapı (Å) | 0.23 |
| Elektron Sayısı (yüksüz) | 5 |
| Nötron Sayısı | 6 |
| Proton Sayısı | 5 |
| Değerlik Elektronları | $2s^2\ p^1$ |

Bor, yerkabuğundaki en yaygın 51. elementtir. Bor mineralinin topraktaki konsantrasyonu 10-20 mg/l, deniz suyundaki konsantrasyonu 0.5-9.6 mg/l, tatlı sulardaki konsantrasyonu ise 0.001-1.5 mg/l aralığında değişmektedir [22].

Bor elementi, morfolojisine ve tanecik büyüklüğüne bağlı olarak farklı kimyasal özellikler göstermektedir. Mikron boyutundaki amorf bor kolayca ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristalin bor kolay reaksiyon vermemektedir. Bor, yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer yan ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı

olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur [21]. Bor elementinin fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Bor elementinin fiziksel özellikleri [21]

| | |
|---|---|
| Atomik Kütlesi (g/mol) | 10.811 |
| Kaynama Noktası (°C) | 4002 |
| Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C) (0°C) | 0.0000083 |
| Termal İletkenlik (W/cmK) | 0.274 |
| Yoğunluk (g/cm$^3$) (300K) | 2.34 |
| Görünüş | Sarı-kahverengi ametal kristal |
| Bulk Modülü (GPa) | 320 |
| Atomizasyon Entalpisi (kJ/mol) (25°C) | 573.2 |
| Füzyon Entalpisi (kJ/mol) | 22.18 |
| Buharlaşma Entalpisi (kJ/mol) | 480 |
| Mohs Sertliği | 9.3 |
| Buharlaşma Isısı (kJ/mol) | 489.7 |
| Ergime Noktası (°C) | 2300 |
| Molar Hacmi (cm$^3$/mol) | 4.68 |
| Fiziksel Durumu (20°C ve 1 atm) | Katı |
| Spesifik Isısı (J/gK) | 1.02 |
| Buhar Basıncı (Pa) (2300°C) | 0.348 |

## 2.2 Önemli Bor Mineralleri

Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit ($B_2O_3$) içeren doğal bileşiklerdir. Önemli bor mineralleri Çizelge 2.3'de verilmiştir. Doğada serbest olarak bulunmayan bor; sodyum, kalsiyum, magnezyum ve sodyum kalsiyum borat formunda metal boratlar olarak bulunmaktadır [22].

Çizelge 2.3 Bor mineralleri [23]

| Tip | Mineral | Bileşim | %$B_2O_3$ |
|---|---|---|---|
| Hidrojen Boratlar | Sasolit | $H_3BO_3$ | 56.3 |
| Sodyum Boratlar | Tinkal | $Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$ | 36.5 |
| | Tinkalkonit | $Na_2B_4O_7{\cdot}5H_2O$ | 47.8 |
| | Kernit | $Na_2B_4O_7{\cdot}4H_2O$ | 51.0 |
| Sodyum-Kalsiyum Boratlar | Üleksit | $NaCaB_5O_9{\cdot}8H_2O$ | 43.0 |
| | Propertit | $NaCaB_3O_9{\cdot}5H_2O$ | 49.6 |
| Kalsiyum Boratlar | Kolemanit | $Ca_2B_6O_{11}{\cdot}5H_2O$ | 50.8 |
| | Pandermit | $CaB_{10}O_{19}{\cdot}7H_2O$ | 49.8 |
| Kalsiyum Borosilikatlar | Datolit | $CaBSiO_4OH$ | 24.9 |
| Magnezyum Boratlar | Hidroborasit | $CaMgB_6O_{11}{\cdot}6H_2O$ | 50.5 |
| | Aşarit | $MgBO_2OH$ | 41.4 |
| | Borasit | $Mg_3B_7O_{13}Cl$ | 62.2 |

Ticari açıdan kullanımı en yaygın olan bor mineralleri tinkal, üleksit, kolemanit ve kernittir. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bor mineralleri ise sodyum içerikli tinkal, kalsiyum içerikli kolemanit ve sodyum-kalsiyum içerikli üleksittir [24].

### 2.2.1 Tinkal ($Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O$)

Tinkal (Şekil 2.1) minerali, monoklinik kristal yapıya sahiptir ve yoğunluğu 1.73 g/$cm^3$'tür. Mohs sertliği ise 2-2.5'tir. Toz halindeki tinkal beyaz renktedir ve saydam kristaller içermektedir. Tinkal, doğada en çok bulunan ve ticari önemi büyük olan bir bor mineralidir. Su ile bağ oluşturma ve ayrışma yeteneği yüksek olan tinkal minerali, tinkalkonit mineraline kolayca dönüştürülebilir. Doğada, kille ara katkılı olarak üleksit ve tinkalkonit ile birlikte bulunan tinkal, ülkemizde Eskişehir-Kırka yataklarında üretilmektedir [25].




Şekil 2.1 Tinkal [26]

### 2.2.2 Kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}\cdot 5H_2O$)

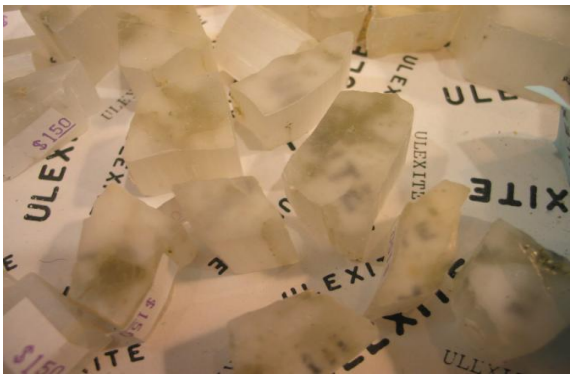
Kolemanit (Şekil 2.2) mineralinin kristal sistemi monokliniktir. Sertliği 4-4.5, özgül ağırlığı 2.42 g/cm$^3$'tür. $B_2O_3$ içeriği ise %50.8'dir. Kolemanit su içerisinde yavaş, HCl içerisinde hızlı çözünür. Bor bileşikleri içerisinde en yaygın olanıdır. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarında, dünyada ise ABD'de bulunur. Ülkemizde en fazla bulunan bor minerali kolemanittir [25, 27].



Şekil 2.2 Kolemanit [28]

### 2.2.3 Üleksit ($NaCaB_5O_9\cdot 8H_2O$)

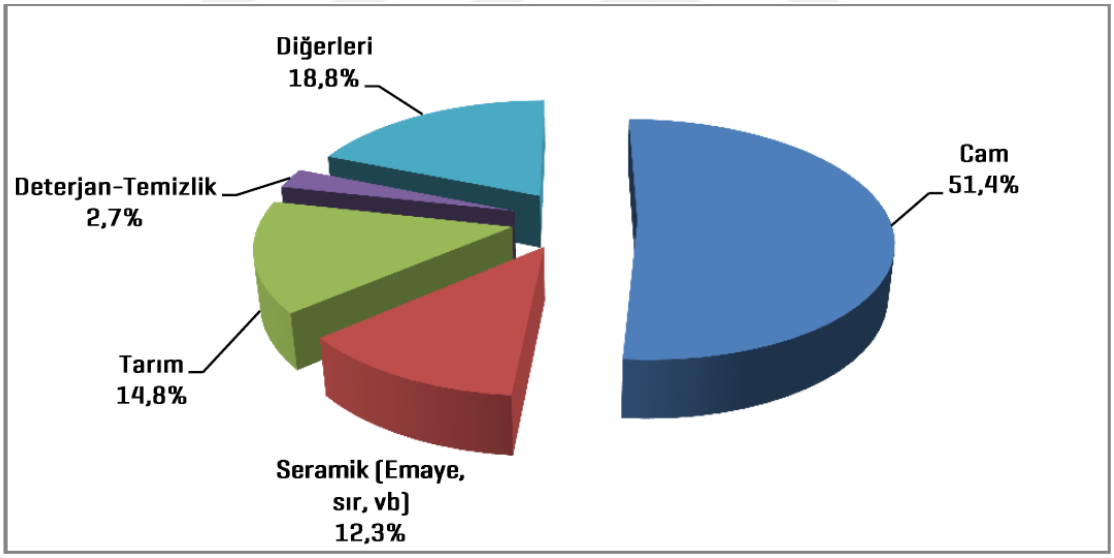
Kristal sistemi monoklinik olan üleksit (Şekil 2.3) minerali beyaza benzeyen hafif şeffaf görünüşünden dolayı pamuk gülü olarak da adlandırılmaktadır. Sertliği 2.5 ve özgül ağırlığı 1.96 g/cm$^3$'tür. Soğuk suda az çözünen üleksit sıcak suda ve asit içerisinde kolayca çözünür [29].



Şekil 2.3 Üleksit [30]

## 2.3 Bor Minerallerinin Kullanım Alanları

Bor, nihai kullanım alanı olan sektörlerde çoğunlukla bor kimyasalları şeklinde tüketildiği gibi doğrudan konsantre bor olarak da tüketilebilmektedir. Sayısı 450'yi aşan bor bileşiklerinden Dünya'da en çok kullanılanları borik asit ($H_3BO_3$), susuz borik asit ($B_2O_3$), boraks dekahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), boraks pentahidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$), susuz boraks ($Na_2B_4O_7$) ve sodyum perborat ($NaBO_2 \cdot H_2O_2 \cdot 3H_2O$)'tır [22, 24].




Şekil 2.4 Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı [24]

Bor minerallerinin başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

❖ **Cam Sanayi:** İnşaat, elektrik-elektronik, otomotiv, ev eşyaları, ilaç, mobilya gibi pek çok önemli sanayi dalında kullanılan cam, bor tüketimi için en önemli endüstri dalıdır. Bor, borosilikat camlar, cam yünü ve tekstil tipi cam elyafı üretiminde çok önemli bir bileşendir. Bor ürünleri tüketiminin çok önemli bir kısmı bu üç sektörde

yoğunlaşmaktadır. Cam elyafı sektörü (hem yalıtım ve hem de tekstil tipi olmak üzere) bor ürünleri için en büyük pazar olup dünya bor tüketiminin yaklaşık %50'si bu sektörde gerçekleşmektedir.

Cam üretiminde kullanılan bor ürünleri üretilecek camın cinsine göre değişiklik göstermektedir. Boraks pentahidrat ve üleksit, yüksek kaliteye sahip, yalıtım amaçlı cam yünü üretiminde kullanılan iki temel bor ürünüdür. Borik asit ve kolemanit ise, inşaat, otomotiv, elektronik, enerji ve spor aletleri sektörlerinde kullanılan dayanıklı plastik ve kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan tekstil tipi cam elyafı üretimi için temel bor ürünleridir [31].

❖ **Tarım:** Bor ürünleri, tarım ve ormancılıkta gübre olarak veya istenmeyen otlarla ve böceklerle mücadelede yaygın olarak kullanılmaktadır. Boraks pentahidrat ve boraks dekahidrat, gübre olarak kullanılan bor ürünleridir. Sodyum boratlar, toprağa doğrudan verilebildiği gibi kolay çözünmeleri nedeniyle bitkiler üzerine püskürtülerek de başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Kolemanit, çözünürlüğünün az olması nedeniyle özellikle kumlu topraklarda kullanılmaktadır ve bu özelliği nedeniyle sodyum boratlara göre daha uzun süre toprakta kalmaktadır. Bor ürünleri, böcek/haşere ile mücadelede pestisit, ahşap malzemeleri mantar gibi zararlı organizmalardan korumak amacıyla da fungusit olarak kullanılmaktadır [32].

❖ **Seramik Sanayi:** Türkiye'nin en çok bor tükettiği sektörlerden biri seramik sanayidir. Bor, seramik malzemelerin sırla kaplanması sırasında silisin kolay erimesini ve seramik yüzeyine çabuk yayılmasını sağlamak amacıyla kullanılır. Ayrıca sır için kullanılan karışımda bor miktarı arttırılır, silis miktarı azaltılırsa; sır daha dayanıklı ve daha sert hale gelir ve parlak bir görünüm kazanır [29].

❖ **Metalurji ve Malzeme:** Boratlar yüksek sıcaklıklarda koruyucu, yapışkan, temiz ve çapaksız sıvı oluşturma özellikleri nedeniyle demir dışı metal endüstrisinde cüruf oluşturucu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadırlar.

Bor bileşikleri, elektrolit kaplama endüstrisinde elektrolit üretilmesinde kullanılmaktadırlar. Borik asit nikel kaplamada, fluoboratlar ve fluoborik asitler ise; bakır, kalay, nikel, kurşun gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır.

Bor bileşikleri alaşımlarda ise özellikle çeliğin sertliğini arttırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla ferrobor kullanımı oldukça önem kazanmıştır [33].

❖ **Yalıtım:** Bor, tekstil ürünleri, plastik, ahşap, kağıt ve pamuk gibi doğal fiberlerde ve boyada yanmayı geciktirici olarak kullanılmaktadır. Selülozik yalıtımda borik asit ve boraks pentahidrat; tekstilde borik asit ve boraks, PVC'de ise çinko borat, bor fosfatlar, baryum metaborat ve amonyum fluoborat kullanılmaktadır. Borlu bileşikler yanma sırasında malzemenin oksijenle temasını keserler ve böylece alevi bastırırlar. Ayrıca malzemenin tutuşmaya karşı direncini arttırırlar, duman azaltırlar ve zararlı gazların oluşmasını engellerler [34].

❖ **Enerji:** Bor, hidrojenin kimyasal olarak depolanmasında, güneş panellerinde ve pillerinde, yakıt pillerinde, lityum iyon pillerinde ve yüksek ısı transistörlerinde kullanılmaktadır [35].

❖ **Temizlik Ürünleri:** Perboratlar 55°C'ın üzerinde aktifleştikleri için sıcak yıkamalarda kullanılan çamaşır tozlarının üretiminde ve sabun yapımında kullanılırlar. Aktif oksijen kaynağı olan sodyum perborat ise yıkama öncesinde kullanılan temizleyicilerin üretiminde kullanılmaktadır [36].

❖ **Nükleer Uygulamalar:** Atom reaktörlerinin üretilmesinde borlu çelikler, titanbor alaşımları ve bor karbür kullanılmaktadır. Paslanmaz borlu çelik nötron absorbanı olarak kullanılmaktadır. Bir bor atomu yaklaşık olarak bir nötronu absorbe etmektedir. Atom reaktörlerinin kontrol sistemlerinde, soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm sistemlerinde de bor ($B_{10}$) kullanılmaktadır. Kolemanit, nükleer atıkların depolanması sırasında kullanılmaktadır [22].

❖ **Uzay ve Havacılık:** Bor minerali ve borlu bileşikler iletişim sistemleri, radarlar, uçaklar, uydular, uçuş yakıtları, sürtünmeye ve ısıya dayanıklı kompozit malzemelerin üretimi başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bor; askeri hava araçları, füze, helikopter ve uçakların yapımında kullanılan maddelerden biridir.

Borun yanıcı olmasına rağmen tutuşma sıcaklığının yüksek olması, yanma sonucunda kolaylıkla aktarılabilecek katı ürün vermesi ve çevreyi kirleten emisyon ortaya çıkarmaması borun ulaşım araçlarında kullanılması açısından avantajlıdır [29].

❖ **İnşaat-Çimento Sektörü:** Bor; izolasyon ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla, daha sağlam, daha hafif, depreme ve ısıya dayanıklı binaların yapılmasında, termal (borosilikat) camların üretilmesinde, çimentoya ve çeliklere mukavemet arttırıcı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Kolemanit, çimento üretiminde klinker pişirme sıcaklığını düşürmek amacıyla katkı maddesi olarak kullanılmaktadır ve çimentonun mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Bor katkısı içeren çimento; mukavemet, hidratasyon ısısı, su ve gaz geçirgenliği gibi özellikleri açısından Portland çimentosundan daha iyi performans göstermektedir. Hidratasyon ısısının düşük olması özellikle kütle betonlarında soğutma ihtiyacını önemli oranda azaltmaktadır. Çimento üretiminde kolemanit kullanılması atmosfere salınan karbon dioksit miktarının %25-30 oranında azaltılmasını sağlamaktadır [25, 37].

## 2.4 Borik Asit ve Üretim Yöntemleri

Borik asit ($H_3BO_3$), endüstride en çok kullanılan bor ürünlerinden biridir. Borik asit borakstan, kolemanitten, kernitten, üleksitten, borasitten ve boraks içeren göl sularından çeşitli yöntemlerle elde edilmektedir.

Borik asit, ortoborik asit ve borasis asit olarak da adlandırılmaktadır. Borik asit kokusuz, kristal yapıda, beyaz renkli bir maddedir. Kristal sistemi trikliniktir ve birim hücre dört molekül $H_3BO_3$ içerir. Borik asitin bazı özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir [38].

Çizelge 2.4 Borik asitin özellikleri [38]

| | |
|---|---|
| Molekül Ağırlığı (g/mol) | 61.83 |
| Özgül Ağırlığı (g/cm$^3$) (20°C) | 1.44 |
| Erime Noktası (°C) | 171 |
| Oluşum Isısı (kJ/mol) | -1089 |
| $B_2O_3$ İçeriği (%) | 56.3 |
| Çözünme Isısı (kJ/mol) | 22.2 |
| Kaynama Noktası (°C) | 300 |
| Suda Çözünürlük (g/100 ml) (20°C) | 4.72 |

Borik asitin kullanım alanları aşağıdaki gibidir:

❖ Borik asit; cam elyafı, fırın camları ve laboratuvar cam malzemeleri gibi özel camların üretilmesinde kullanılmaktadır. Borik asit ilavesi ile camın ısıya, mekanik etkilere ve kimyasallara karşı dayanımı arttırılmaktadır. Ayrıca tekstil tipi fiberglas endüstriyel borulardan bilgisayar kartlarına kadar birçok kullanım alanı bulunan plastiklerin güçlendirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Borik asit katkısı ile fiberglasların üretiminde viskozite düşürülerek fiberleşme arttırılmaktadır.

❖ Borik asit, gelişmiş bağlayıcı özellikleri nedeniyle seramik sırların üretilmesinde kullanılmaktadır. Borik asit katkısı, mekanik ve kimyasal mukavemeti arttırarak, seramiğin kimyasal ortamlardaki dayanımını güçlendirir. Ayrıca renk verme katkı maddesi için de ortam sağlar.

❖ Borik asit, temizlik maddelerinin üretilmesinde mikrop öldürme ve ağartma gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Ayrıca su yumuşatma özelliği nedeniyle deterjan ve sabun üretiminde de borik asit kullanılmaktadır.

❖ Nükleer santrallerde nötron fizyon hızını düşürerek nötron tutmak amacıyla borik asit kullanılmaktadır. Reaktör soğutucusuna borik asit ekleyerek reaktör içerisinde dolaşması sağlandığında nötronların fizyona uğrama olasılıkları azalmaktadır. Böylece reaktör içerisinde gerçekleşecek olan fizyonun hızı etkili şekilde kontrol edilmiş olur.

❖ Borik asit küçük yanıklar ve kesikler için antiseptik olarak kullanılmaktadır. Borik asitin çok seyreltik çözeltileri göz yıkama çözeltisi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca seyreltik borik asit çözeltisi bakterilerin yok edilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.

❖ Borik asit hamamböceği, karınca, beyaz karınca, pire ve birçok böceğin yok edilmesinde veya kontrol altına alınmasında kullanılmaktadır. Borik asit, böcekleri metabolik olarak zehirlemektedir ve borik asit tozu da böceklerin dış iskeletine aşındırıcı etki göstererek öldürmektedir.

❖ Borik asitin kolloidal süspansiyonlarının petrol ve bitkisel yağ içerisinde çözündürülmesiyle seramik ve metal yüzeyler için kayganlaştırıcı oluşturulmaktadır. Borik asit katkısı sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürmektedir [39].

### 2.4.1 Borik Asitin Üretim Yöntemleri

Günümüzde borik asit üretimi kolemanitten ve tinkalden olmak üzere iki farklı hammaddeden gerçekleştirilmektedir. Borik asit, Türkiye ve Avrupa ülkelerinde kolemanit kullanılarak üretilirken Amerika'da ise tinkal kullanılarak üretilmektedir.

#### 2.4.1.1 Kolemanitten Borik Asit Üretimi

Kolemanitten borik asit üretimi (2.1)'de verilen reaksiyondan yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Kolemanit ve sülfürik asitin reaksiyonu sonucu jips ve borik asit oluşmaktadır.

$$Ca_2B_6O_{11}\cdot 5H_2O + 2H_2SO_4 + 6H_2O \rightarrow 6H_3BO_3 + 2[CaSO_4\cdot 2H_2O] \quad (2.1)$$

Borik asit fabrikası aşağıda açıklanan 4 üniteden oluşmaktadır [40]:

**1. Kırma-Öğütme Ünitesi:** İlk olarak kolemanit, boyutu 0.2 mm'den küçük olacak şekilde değirmenlerde öğütülür. Öğütülen kolemanitin sülfürik asit ile reaksiyona girmesi sağlanarak kolemanit çözeltiye alınır. Kolemanit ve sülfürik asit arasındaki reaksiyon 80-100°C'de gerçekleşir.

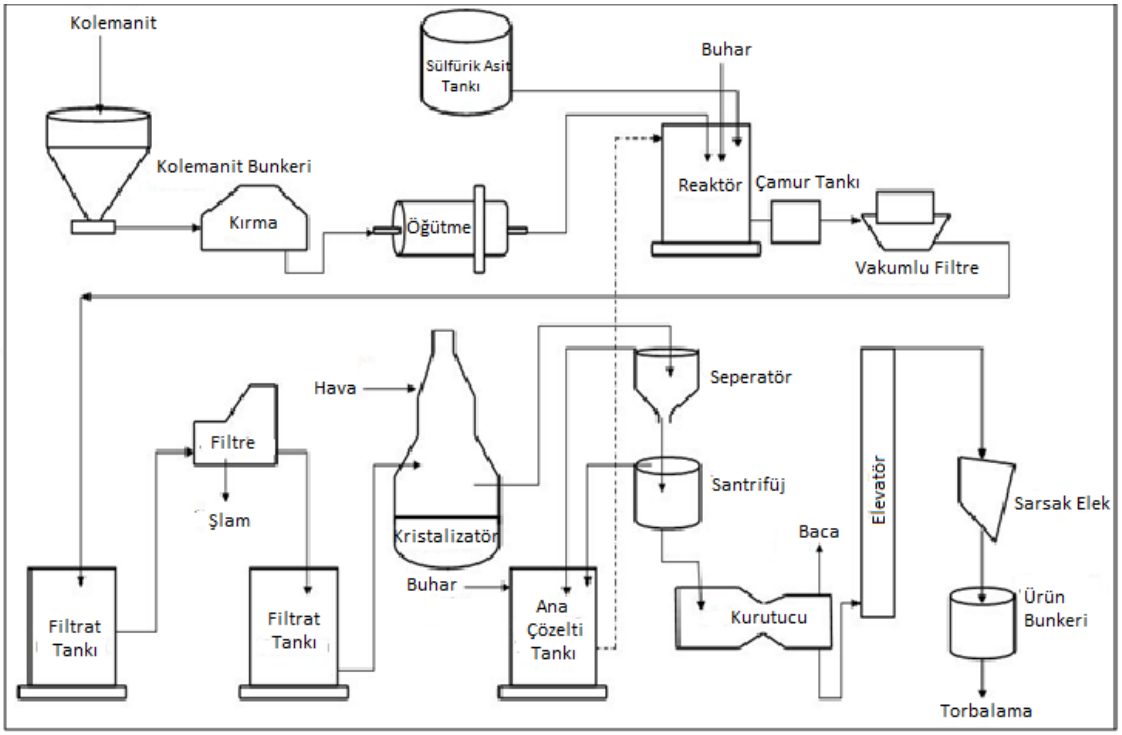
**2. Reaksiyon-Filtrasyon Ünitesi:** Kolemanit sülfürik asitle çözeltiye alındıktan sonra, gerçekleşen reaksiyon sonucunda jips çamuru oluşmaktadır. Oluşan jipsin ortamdan uzaklaştırılması amacıyla çözelti basınçlı filtrelerde süzülür. Bu amaçla, iki aşamalı olarak süzme işlemi yapılır. İlk aşamada tüm çözelti 15-20 dakika boyunca süzülür. İkinci aşamada ise ilk aşamadan elde edilen süzüntü başka bir basınçlı filtrede 3 saate yakın süzülür. Filtrasyon aşamaları sonucunda ortaya çıkan jips çamuru atık havuzuna gönderilerek bu havuzda depolanır.

**3. Kristalizasyon ve Santrifüjleme Ünitesi:** Filtrasyondan sonra elde edilen kolemanit çözeltisi, sabit debi ile kristalizatöre beslenir. Kristalizatöre alınan çözelti, özel spreyler yardımıyla püskürtülerek çözeltinin kristalizatöre yayılması sağlanır. Böylece oluşan kristallerin boyutu arttırılarak işlemin daha verimli devam etmesi sağlanmış olur.

Çözelti kristalizatöre 80-90°C sıcaklıkta girer. 40-45°C sıcaklıkta kristalizatörden çıkan çözelti santrifüje beslenir. Santrifüjde, çözeltinin kristallerden ayrılması sağlanır.

**4. Kurutma-Torbalama Ünitesi:** Santrifüjden çıkan kristaller nem içeriğini gidermek amacıyla akışkan yataklı kurutucular kullanılarak kurutulmaktadır. Kurutucudan çıkan ürün torbalama ünitesinde torbalanarak satışa hazır hale getirilir.

Kolemanitten borik asit üretim şeması Şekil 2.5'de verilmiştir.




Şekil 2.5 Kolemanitten borik asit üretimi proses şeması [39]

### 2.4.1.2 Tinkalden Borik Asit Üretimi

Tinkalden borik asit üretimi en fazla Amerika'da gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde ise tinkal rafine boraks pentahidrat, rafine boraks dekahidrat, susuz boraks, sodyum perborat tetrahidrat ve sodyum perborat monohidrat üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır [41].

Tinkalden borik asit üretiminde birçok farklı yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri tinkal konsantresinin klorik asit veya nitrik asit kullanılarak çözündürülmesiyle borik asit elde edilmesidir. Ancak bu yöntemde kullanılan kuvvetli asitler ekipmanların ömrünü kısaltmakta ve borik asit üretim maliyetini arttırmaktadır. Diğer borik asit üretim yöntemi ise tinkal konsantresinin 80°C'deki sulu çözeltisinin elektrolizidir. Bu yöntemin dezavantajı ise enerji gereksiniminin çok yüksek olmasıdır. Bu nedenle, tinkalden borik asit üretilmesinde genel olarak sülfürik asit

kullanılmaktadır [38]. Tinkalin sülfürik asitle (2.2)'de verilen reaksiyonu sonucu oluşan sodyum sülfat ve borik asit kristallendirilerek borik asit elde edilmektedir.

$$Na_2B_4O_7{\cdot}10H_2O + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 4H_3BO_3 + 5H_2O \quad (2.2)$$

Ülkemizde, kolemanit rezervlerinin tinkal rezervleri kadar yüksek olması ve doğal sodyum sülfat kaynaklarının oldukça fazla olması kolemanit kullanılarak yapılan üretimi daha uygun kılmaktadır [42].

## 2.5 Borjips

Borjips (Şekil 2.6), borik asit üretimi prosesinde kolemanit ve sülfürik asitin reaksiyonu sonucu oluşan atık maddedir. Borik asit üretimi sırasında reaksiyona girmeyen kolemanit ve diğer safsızlıkların kalsiyum sülfat ile birleşmesiyle katı atık oluşur. Borik asit kristalizasyonu öncesinde katı atığı ayırmak için pres-filtrayon uygulanır ve filtre keki adı verilen katı atık elde edilir (2.1). Elde edilen bu katı atık birincil olarak jips ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$) ve ikincil olarak da bor oksit ($B_2O_3$) içermektedir. $B_2O_3$ içermesi nedeniyle bu atığa borjips adı verilmektedir. Oluşan atığın miktarı yaklaşık 550,000 ton/yıl'dır [12, 43].



Şekil 2.6 Borjips

# BÖLÜM 3

# BETON VE ÇİMENTO

## 3.1 Beton

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle katılaşıp istenilen şekli alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir. İri agregası olmayan beton ise harç olarak adlandırılmaktadır. Sadece çimento ve sudan oluşan karışım ise çimento hamuru olarak adlandırılmaktadır [15, 44].

## 3.2 Beton Bileşenleri

Betonu oluşturan bileşenler agrega, çimento, su ve katkı maddeleridir.

### 3.2.1 Agrega

Agrega, beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelere verilen addır. Agrega beton içerisinde hacimsel olarak %60-75 oranında yer kaplamaktadır ve beton için önemli bir bileşendir [45].

Agregalar kaynağına, tane büyüklüğüne ve özgül ağırlığına göre 3 farklı şekilde sınıflandırılmaktadırlar.

Agregalar kaynakları esas alınarak doğal agregalar ve yapay agregalar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğal agregalar; nehir yataklarında, deniz ve göl kıyılarında doğal

olaylar sonucu oluşan kum ve çakıl gibi agregalar ile taş ocaklarından çıkarılan kayaların kırılarak elenmesi ile elde edilen kırma taş agregalardır. Yüksek fırın cürufu, pişmiş kil, uçucu kül gibi bazı endüstriyel işlemlerde yan ürün olarak elde edilen malzemeler de yapay agrega olarak adlandırılırlar.

Göz açıklığı 4.0 mm olan kare delikli elekten geçen agregaya ince agrega, bu elek üzerinde kalan agregaya da iri agrega denir. İnce agreganın alt sınırı da 0.25 mm göz açıklığı olan elektir. Bu eleğin altına geçen malzemeye "filler" denir. Agrega ocağından alınan ve elenmeden olduğu gibi kullanılan doğal agregaya "tuvenan" denir.

Özgül ağırlıkları 2.4-2.8 arasında olan agregalar normal ağırlıklı agrega, özgül ağırlığı 2.4'den düşük olan agregalar hafif agrega ve 2.8'den büyük olanlar ise ağır agrega olarak adlandırılmaktadır [46].

Agregaların maksimum tane boyutları, tane boyutu dağılımları, yüzey dokuları, tane şekilleri, tane yoğunlukları, su emme özellikleri, birim ağırlıkları, içerdikleri zararlı ve yabancı maddelerin türü ve miktarları, dayanımları, dona dayanıklılıkları, aşınmaya karşı dayanıklılıkları, ısıl özellikleri ve elastiklik modülü gibi özellikleri üretilen betonun özelliklerini etkilemektedir [47].

Agregalarda aranan en önemli özellikler aşağıda sıralanmıştır [44]:

- Sert ve boşluksuz olmaları,
- Deniz kabuğu, odun, kömür gibi zayıf taneler içermemeleri,
- Basınca ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.

### 3.2.2 Çimento

Kil ve kalker içeren malzemelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400-1500°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcı özellik

gösteren maddelere çimento adı verilmektedir. Hidrolik bağlayıcı maddeler, su ile reaksiyonu sonucu sert bir kütle oluşturduktan sonra su içerisinde dağılmayan, sertliğini ve dayanımını koruyan veya arttıran bağlayıcı maddelerdir [47, 48].

Çimento hamuru, beton içerisinde yer alan agrega taneciklerinin yüzeyini kaplayarak aralarındaki boşlukları doldurmakta ve oluşan kompozitin katılaşmasını sağlamaktadır. Çimentonun özellikleri ve beton içerisindeki miktarı, taze betonun özelliklerini ve sertleşmiş betonun dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir [47].

#### 3.2.2.1 Çimento Hammaddeleri

Çimento klinkerinin elde edilmesi için gerekli başlıca bileşenler kalsiyum oksit ve silisyum oksittir. Ayrıca klinkerin erime sıcaklığını düşürmek için az miktarda alüminyum oksit ve demir oksitte gerekmektedir. Bu kimyasal maddeleri içeren mineraller kireç taşı (veya kalker) ve kildir. Aynı amaçla bu maddelerin doğal karışımı olan kalkerli marn da kullanılabilir. Kireç taşı veya kalker ile klinker için gerekli olan kalsiyum oksit karşılanır. Kil ise klinkerin silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimlerini karşılar.

❖ **Kalker:** Bileşiminde %90'a kadar kalsiyum karbonat içeren kayaçlara kalker veya çok saf haline kireç taşı denir. Kalkerler genellikle saf halde bulunmazlar ve bileşimlerinde kalsiyum karbonatın yanı sıra değişik oranlarda magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir-silikat oksit ve silis gibi bileşikleri içerir.

❖ **Kil:** Çimentonun ikinci hammaddesi olan kil minerallerinin bileşimlerinde alüminyum oksit ve alüminyum silikat hidrat bulunmaktadır. Önemli kil mineralleri kaolinit grubu kil mineralleri ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ve montmorillonit grubu kil mineralleri ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O+nH_2O$)'dir. Kil mineralleri alüminyum silikatların yanı sıra az miktarda magnezyum, kalsiyum, sodyum ve potasyum elementlerini de içerirler.

❖ **Marn:** Doğada bulunan kalker ve kilin, %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaçlardır. Yeryüzünde yaygın olarak bulunması nedeniyle çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır.

❖ **Alçı Taşı:** Doğada kalsiyum sülfat minerali biri iki molekül kristal suyu içeren jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), diğeri susuz kalsiyum sülfat anhidrit ($CaSO_4$) minerali olmak üzere iki

şekilde bulunmaktadır. Bu mineraller doğada hiçbir zaman saf halde bulunmazlar. Çimento üretiminde genellikle jips kullanılmaktadır. Alçı taşı, çimento harcının priz süresini geciktirmek amacıyla, çimento üretiminde klinker içerisine %3-5 oranında karıştırılarak kullanılmaktadır [46].

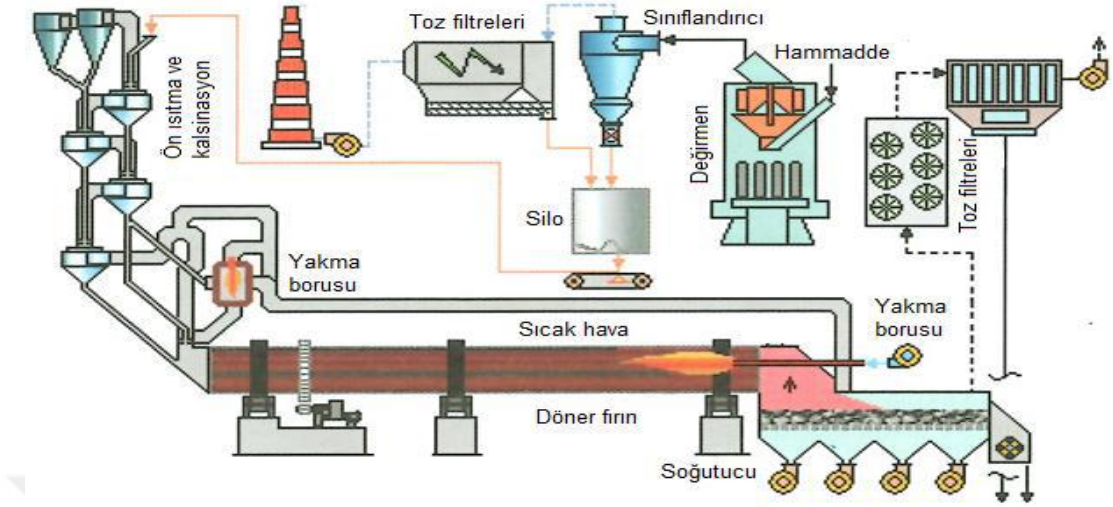
#### 3.2.2.2 Çimento Üretimi

Çimento, kil ve kalker içeren hammaddelerin, yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle oluşan klinkerin, %3-5 oranında alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen bağlayıcı özelliğe sahip malzemedir. Pişirme işlemi döner fırın adı verilen, içi boş ve kendi ekseni etrafında dönebilen, yatay yerleştirilmiş silindir şeklindeki fırın ile yapılmaktadır. İçi ateş tuğlası ile kaplı olan bu çelik fırın, bir ucu diğer ucundan daha yüksekte kalacak şekilde, yaklaşık %3-6 eğimle yerleştirilir. Çapı 2-6 metre arasında değişen döner fırınların en/boy oranı 15-30 aralığındadır ve sıcaklık artışı fırının alt ucundan püskürtülen yakıtla sağlanır. Bu yakıt fuel-oil olabildiği gibi, son yıllarda ekonomik nedenlerle kömürden de yararlanılmaktadır.

Başlangıçta çimento yaş sistemle üretilmekteydi. Bu sistemde hammadde karışımı fırına yaş olarak yaklaşık %35 oranında su içeren çamur halinde girmekteydi. 1950'li yıllardan itibaren kuru sistemli ve ön ısıtıcılı döner fırınlar kullanılmaya başlanmıştır. Önceki yıllarda yaş yöntemin seçilmesinin nedeni öğütülen hammaddelerin ancak çamur halinde homojenize edilebilmesiydi. Günümüzde hammaddelerin kuru olarak homojenizasyonu için teknikler geliştirilmiş ve böylece büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlanmıştır [46].

Şekil 3.1'de verilen proseste görüldüğü gibi öğütülerek uygun oranlarda karıştırılan kil ve kalker içeren hammaddeler, döner fırınlarda yaklaşık 1350-1450°C'de pişirilirler. Fırın içerisinde pişirilen hammaddeler arasında sıcaklığın etkisiyle gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda klinker oluşmaktadır. Klinker sert, gözenekli ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir ve yuvarlak şekildedir. Klinkerin yaklaşık çapı 1-25 mm civarındadır ve yeşilimsi gri (veya koyu gri) renktedir. Döner fırından çıkarılan klinker soğutulduktan sonra ince bir şekilde öğütülür. Klinkerin öğütülmesi sırasında içerisine alçı taşı da

eklenerek öğütme işlemi yapılır. Bu şekilde elde edilen ürüne Portland çimentosu adı verilir [15].




Şekil 3.1 Çimento üretim prosesi [49]

Kalker ve kil içeren hammaddeler döner fırına yüklendikten sonra sıcaklığın etkisiyle sırasıyla aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelir [50, 51];

❖ 100°C civarında hammaddelerin içerdiği serbest su buharlaşır.

$H_2O_{(l)} + ısı \rightarrow H_2O_{(g)}$ (3.1)

❖ Kilin yapısında bulunan en önemli bileşen $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ formülündeki kaolindir. 500-600°C civarında su molekülü kaolinden ayrılır ve kaolin, silika ($SiO_2$) ve amorf alüminaya ($Al_2O_3$) dönüşür.

$2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O + ısı \rightarrow 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 + 2H_2O$ (3.2)

❖ 600-700°C sıcaklıklarda kalker içerisindeki magnezyum karbonat ($MgCO_3$) ayrışarak magnezyum oksit (MgO) haline dönüşür.

$MgCO_3 + ısı \rightarrow MgO + CO_2$ (3.3)

❖ 900°C civarında kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), ağırlığının yaklaşık %44'ünü oluşturan karbondioksiti ($CO_2$) kaybederek sönmemiş kirece (CaO) dönüşür.

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ (3.4)

❖ 900-1200°C sıcaklıkta sönmemiş kireç, silis ve alümina arasında kimyasal reaksiyonlar başlar ve kireç ile silisin reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikatlar, sönmemiş kireç ile alüminanın tepkimesi sonucunda ise alüminatlar oluşur.

$2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ (3.5)

$2CaO + Al_2O_3 \rightarrow 2CaO \cdot Al_2O_3$ (3.6)

$2CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 2CaO \cdot Fe_2O_3$ (3.7)

$CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ (3.8)

$CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ (3.9)

❖ 1250-1280°C arasında oksitlerin eriyik haline dönüşmeye başlamasından sonra çimento bileşenleri (Çizelge 3.2) oluşmaya başlar.

❖ Sıcaklığın artması ile birlikte bu tepkimeler daha da hızlanarak klinkerin oluşmasını sağlarlar.

Portland çimentosunu oluşturan oksitler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Portland çimentosunu oluşturan oksitler [50]

| **Bileşen** | **Oksit** | **Çimento Kimyasına Göre Sembolü** | **% Miktar** |
|---|---|---|---|
| Kireç | $CaO$ | C | 60-67 |
| Silisyum Dioksit | $SiO_2$ | S | 17-25 |
| Alümina | $Al_2O_3$ | A | 3-8 |
| Demir Oksit | $Fe_2O_3$ | F | 0.5-6 |
| Kükürt Trioksit | $SO_3$ | S | 1-3 |
| Magnezyum Oksit | MgO | M | 0.1-4 |
| Alkaliler | $Na_2O + K_2O$ | N + K | 0.2-1.3 |

Portland çimentosu Çizelge 3.2'de verilen 4 ana bileşenden oluşmaktadır.

Çizelge 3.2 Portland çimentosunun ana bileşenleri [46, 48]

| **Bileşen** | **Kimyasal Formülü** | **Kısa İsim** | **% Ağırlık** | |
|---|---|---|---|---|
| Trikalsiyum silikat | $3CaO{\cdot}SiO_2$ | $C_3S$ | 50-55 | Alite |
| Dikalsiyum silikat | $2CaO{\cdot}SiO_2$ | $C_2S$ | 20-25 | Belite (α türü) |
| | | | | Felite (β türü) |
| Trikalsiyum alüminat | $3CaO{\cdot}Al_2O_3$ | $C_3A$ | 10-12 | - |
| Tetrakalsiyum alüminoferrit | $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$ | $C_4AF$ | 8-10 | Celite |

Çimento üretimi sırasında ön ısıtmada kısmen kalsine olarak döner fırına giren hammaddeler döner fırında gittikçe artan sıcaklıklarda aşağıdaki reaksiyonlara girerler [46]:

**800°C altında:** $CaO{\cdot}Al_2O_3$ ve $2CaO{\cdot}SiO_2$ oluşumu başlar.

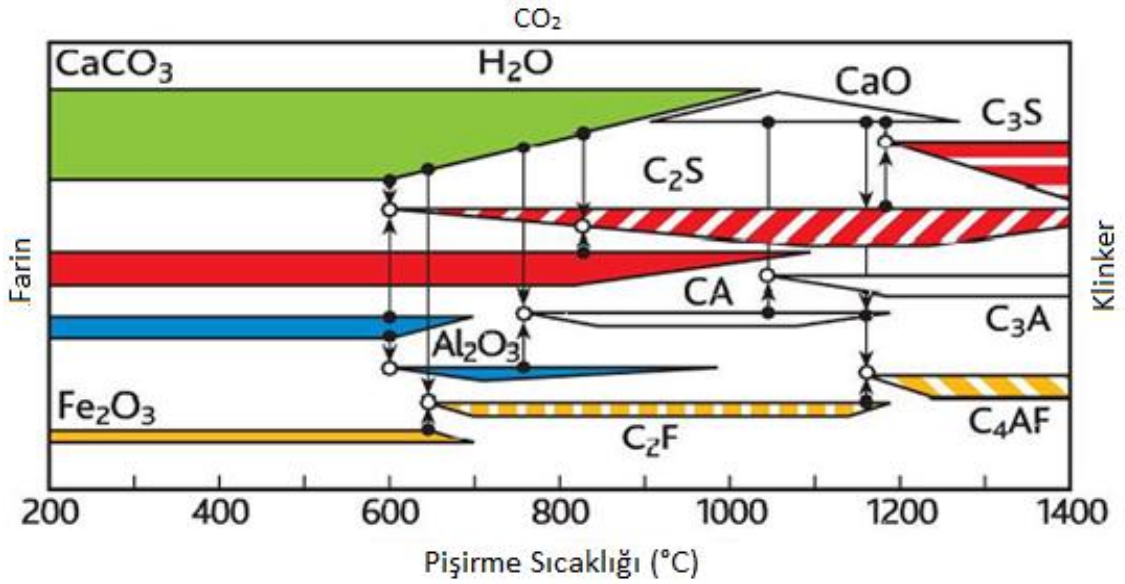
**800°C-900°C:** $C_2AS$ oluşur ve tekrar ayrışır. $C_3A$ ve $C_4AF$ oluşumu başlar ve serbest CaO miktarı maksimum değere ulaşır.

**1100°C-1200°C:** $C_3A$ ve $C_4AF$'nin büyük kısmı oluşur ve $C_2S$ miktarı maksimum değere ulaşır. Ayrıca sıvı faz oluşumu da bu sıcaklıklarda başlar.

**1260°C-1450°C:** $C_3S$ oluşumu ile serbest kireç miktarı gittikçe azalır.

Yukarıdaki reaksiyon aşamaları birbirleriyle çakışabilir ve hammaddelerin homojen olmamaları gelişmeyi önler. Karışımda 1280°C ve daha yüksek sıcaklıklarda sıvı faz oluşuncaya kadar $C_3S$ oluşumu görülmez. $C_3S$'in oluşumu 1350-1450°C'de serbest CaO miktarı çok azaldığı zaman tamamlanır.

Klinker oluşumu sırasında çimento bileşenlerinin yapısında sıcaklıkla meydana gelen değişimler Şekil 3.2'de verilmiştir.




Şekil 3.2 Klinker oluşumu sırasında hammaddelerdeki faz değişimleri [51]

### 3.2.2.3 Çimento Özellikleri

**Hidratasyon:** Çimentoyu oluşturan bileşenler, yüksek kimyasal potansiyele sahip olmaları nedeniyle su ile reaksiyona girerek kolayca çözünürler. Çözünme sonrasında çözeltide hidroliz reaksiyonları meydana gelir. Çimento ve su arasında meydana gelen bu reaksiyonlara "hidratasyon reaksiyonları" denir. İri taneciklerden oluşan çimento su içerisinde yavaşça çözünür. Kalsiyum silikatlar ($C_3S$-$C_2S$), su (H) ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat ($C_3S_2H_3$, kısaca C-S-H) ürünü ile kalsiyum hidroksiti (C-H) meydana getirirler. Oluşan C-S-H jeli çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandırır. C-S-H'ın parçacıkları arasındaki çekim kuvveti çimentonun bağlayıcılık özelliğini sağlamaktadır. Çimento bileşenlerinin su içerisindeki çözünmesi katı partikül yüzeylerinde gerçekleşir. Çözünen bileşiklerin hemen hidrate hale gelerek partikül yüzeyini jel halinde kaplaması nedeniyle henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur. Ayrıca çözeltiye geçmiş klinker bileşikleri de çözelti içinde doygun hale gelerek çözünme hızının azalmasına neden olur. Bu etkiler hidratasyon hızının zamanla azalmasına neden olur. Çimento bileşenlerinin tam olarak hidrate olması için uzun süre geçmesi gerekir. Örneğin hidratasyonun 28. gününde tanecik yüzeylerinde hidratasyon derinliği ancak 4 µm kadardır. Bu derinlik bir yıl sonunda 8 µm'ye ulaşabilir. 50 µm çapında bir klinker partikülünün tam olarak hidrate olması için yaklaşık olarak 5 yılın geçmesi gerekmektedir [13, 46].

Kalsiyum silikatların hidratasyon reaksiyonları aşağıdaki verilmiştir [13]:

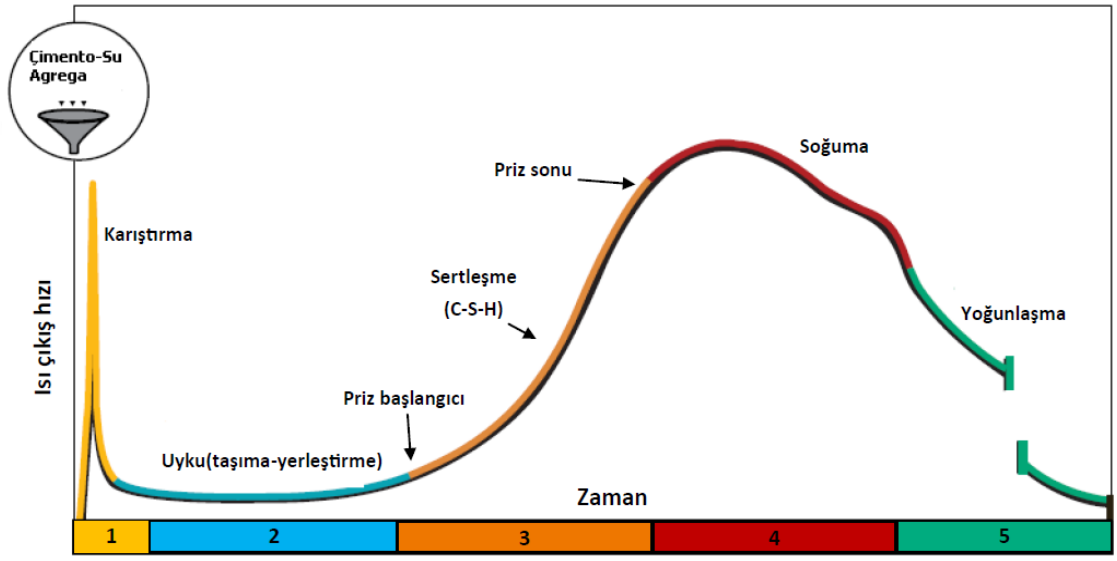
$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \quad (3.10)$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \quad (3.11)$$

$$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6 \quad (3.12)$$

$$C_4AF + 2CH + 10H \rightarrow C_3AH_6 + C_3FH_6 \quad (3.13)$$

Çimento hidratasyonunun aşamaları Şekil 3.3'de verilmiştir.




Şekil 3.3 Hidratasyon süreçleri [52]

Karıştırma süreci 10-15 dakika içerisinde gerçekleşir. Bu süreçte aniden yüksek ısı çıkışı gerçekleşir ve ısı aniden düşüş gösterir. Bu süreç açısından karışım tasarımı önemlidir.

Uyku süreci 2-4 saat içerisinde sona erer. Bu süreçte karışım plastik ve işlenebilirdir. Isı çıkışı çok düşük seviyededir. Uyku sürecinde beton kolayca taşınabilir, yerleştirilebilir ve bitirme işlemi yapılabilir.

Sertleşme süreci 2-4 saat içerisinde sona erer. Bu süreçte yüksek ısı çıkışı olur. Priz ve betonda sertleşme başlar. Beton dayanım kazanmaya başlar. Çok geçmeden küre ve korumaya başlanmalıdır.

Soğuma sürecinde büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilme, dayanım kazanımını geçmemelidir. Bu durum çatlamalara neden olur.

Yoğunlaşma süreci yıllarca devam eder. Beton dayanım ve dayanıklılık kazanmaya devam eder. Erken yaşta beton, ani sıcaklık değişimlerinden üzerine yalıtkan örtüler serilerek korunmalıdır [52].

**Priz:** Hidratasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesiyle çimento hamuru plastik yapısını yavaş yavaş kaybetmeye başlar ve bu nedenle viskozitesinde artış görülür. Bu durum priz (katılaşma) başlangıcıdır. Çimento ve suyun karıştırılması ile çimento hamurunun tamamen katılaşması (sertleşmenin başladığı) arasındaki süre ise priz sonudur.

Priz başlangıç süresi çimento hamurunun katılaşmasından önceki işlenebilirlik süresini belirlediğinden, taze betonun taşınması, kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılması açısından çok önemlidir. Karışımın su miktarı, sıcaklık ve çimentonun nem miktarı priz süresine etki eden fiziksel etkenlerdir. Bu etkenlerden sadece sıcaklık prizi hızlandırır, diğer etkenler ise priz süresini geciktirirler. Çimento inceliğini belirleyen çimento özgül yüzeyinin artması ile de priz süresi kısalır. Kimyasal katkı maddeleri kullanılarak priz süresi değiştirilebilir [36, 53].

Çimento prizi ile ilgili temel olarak iki teori vardır. Bu teorilerden en eski olanı kristalizasyon (çözünme-çökelme) teorisidir. Le Chatelier tarafından geliştirilen bu teoriye göre priz, su içermeyen çimento bileşenlerinin çözeltiye geçmesinden sonra hidratasyon sonucu çökmeleriyle geometrik bir düzene göre dizilip kenetlenmeleri olayıdır. İkinci teori ise 1893'te W. Michaelis tarafından geliştirilen kolloid teorisidir. Bu teoriye göre çimento kolloidal jel halinde çökerek sertleşir, daha sonra kurur ve büzülür [50].

Çimentoya alçı taşı eklenmediğinde $C_3A$ çok hızlı bir şekilde hidratasyona uğrayarak çok kısa süre içerisinde kristaller oluşturarak priz yapar. Büyük miktarda ısı açığa çıkmasıyla gerçekleşen bu olaya ani priz denir [46].

**Sertleşme:** Hidratasyon ve priz olayını izleyen sertleşme olayı, çimento hamurunun iç yapısının şekillenmesini sağlar. Hidratasyonun ilerlemesi ile makro ($10^4$ Å'den büyük boşluklar) ve kılcal boşluklar ($10^4$-$10^2$ Å arası boşluklar) azalır buna karşın mikro ($10^3$-$10^2$ Å arası boşluklar) ve jel boşlukları ($10^2$ Å'den küçük boşluklar) ile jelleşme (C-S-H, C-H) artar. Özgül yüzey alanının artması dayanımların artmasını sağlar. Çimento tanecikleri ile suyun temas etmesi sonucu, çok büyük özgül yüzey alanına sahip hidrate

jellerin oluşması sonucunda sertleşme gerçekleşir. Çimentonun özgül yüzey alanı 3000-4000 $cm^2/g$ arasında iken oluşan hidrate jellerin özgül yüzey alanları ise $2x10^6$-$6x10^6$ $cm^2/g$ arasında değişmektedir [36].

**Hacim Genleşmesi:** Çimentonun bileşiminde yüksek miktarda serbest kireç (CaO) veya magnezyum oksit (MgO) bulunması halinde çimento hamurunun hacminde artış görülür. Bu maddelerin döner fırın içerisindeki oluşumları sırasında, hidratasyonları için gerekli sıcaklıktan daha yüksek sıcaklığa maruz kaldıkları için hidratasyon süreçleri yavaşlar. Bu nedenle çimentonun içerisindeki serbest CaO ve MgO'in hidratasyon reaksiyonları çimento hamurunun veya betonun sertleşmesinden aylar sonra tamamlanır. Bu oksitlerin hidratasyonu sonucunda sertleşmiş çimento hamurunda genleşme gerçekleştiğinden beton yapılarda iç gerilmeler ve çatlamalar gerçekleşebilir [50].

**Rötre:** Rötre (büzülme), tüm Portland çimento çeşitlerinde gerçekleşebilen bir durumdur ve üç boyutlu rötre hacim değişimi, iki boyutlu rötre ise boy değişimi olarak adlandırılmaktadır. Rötre olayı kuruma rötresi, plastik rötre, ısıl rötre ve otojen rötre olmak üzere sınıflara ayrılabilir.

Kuruma rötresi, suyun atmosfere buharlaşması nedeniyle genellikle çimento hamurunun ve bazen de beton içerisindeki agreganın kuruması sonucunda gerçekleşir. Kuruma hızı, betonun yüzey alanının hacmine oranına ve ortamın bağıl nemine bağlıdır. Ortamın bağıl nemi arttıkça gerçekleşen rötre azalır. Yüzey alanı/hacim oranı arttıkça da kuruma rötresi artar. Aynı yüzey alanına sahip ancak farklı kalınlıklara sahip betonlardan ince olanda kurumadan kaynaklı rötre çatlaklarının oluşma riski daha yüksektir.

Plastik rötre, çimentonun plastik kıvamda olduğu durumda hava aşırı sıcak ve rüzgarlı ise genellikle döşeme türü geniş yüzey alanına sahip elemanlarda görülür.

Isıl rötre, sıcaklık değişimi nedeniyle çimento içeren malzemelerde oluşan hacim veya boy değişimidir.

Otojen rötre, hidratasyon reaksiyonları sırasında betonun içsel su tüketimi ile oluşur. Hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan ürünlerin hacmi, hidrate olmamış ürünlerin hacminden daha fazladır.

Agregalar çimento hamurunun rötresini engellemektedir. Bu nedenle agrega hacminin artması ile rötre de azalmaktadır [53, 54].

#### 3.2.2.4 Çimento Çeşitleri

Farklı kulanım amaçlarına uygun olarak çimentonun ana bileşenlerini farklı oranlarda içeren çimentolar üretilmektedir. TS EN 197-1 Standardı'nda [55] özellikleri belirtilen 27 farklı çimentonun içerikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çimento ana bileşenleri; klinker ve Çizelge 3.3'de belirtilen ve miktarları kütlece %5'ten fazla olan ana bileşen katkılardır. Minör ilave bileşenler ise çimentoda ana bileşen olarak kullanılmamış mineral katkılar veya çimentonun özelliklerini geliştirecek inorganik maddelerdir [50].

**CEM I Portland Çimentoları:** Portland çimentosu klinkerinin alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentolardır.

**CEM II Portland Kompoze Çimentoları:** Portland kompoze çimentolar, Portland çimentosu klinkerinin A tipleri için kütlece en çok %20, B tipleri için %35 puzolanik madde ve alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcılardır.

**CEM III Yüksek Fırın Cüruflu Çimentolar:** Yüksek fırın cüruflu çimentolar, Portland çimentosu klinkerinin kütlece %36-95 arasında cüruf ve alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen hidrolik bağlayıcılardır.

**CEM IV Puzolanik Çimentolar:** Puzolanik çimentolar, Portland çimentosu klinkerinin kütlece %11-55 oranında puzolanik madde ve alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentolardır.

**CEM V Kompoze Çimentolar:** Kompoze çimentolar, Portland çimentosu klinkerinin kütlece %18-49 oranında yüksek fırın cürufu ve diğer katkı maddelerinin alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen çimentolardır [33].

Çizelge 3.3 Genel çimentolar sınıfına ait 27 çimento[1] [56]

| Çimento Türü | Adı | Notasyon | Ana Bileşenler (Kütlece % Olarak) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Klinker K | Yüksek Fırın Cürufu S | Silis Dumanı D | Doğal Puzolan P | End. Puzolan Q | Silissi Uçucu Kül V | Kalkersi Uçucu Kül W | Pişmiş Şist T | Kalker (Kireç Taşı) L | Kalker (Kireç Taşı) LL |
| CEM I | Portland Çimento | CEM I | 95-100 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| CEM II | Portland Cüruflu Çimento | CEM II/A-S | 80-94 | 6-20 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | | CEM II/B-S | 65-79 | 21-35 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | Portland Silis Dumanlı Çimento | CEM II/A-D | 90-94 | – | 6-10 | – | – | – | – | – | – | – |
| | Portland Puzolanlı Çimento | CEM II/A-P | 80-94 | – | – | 6-20 | – | – | – | – | – | – |
| | | CEM II/B-P | 65-79 | – | – | 21-35 | – | – | – | – | – | – |
| | | CEM II/A-Q | 80-94 | – | – | – | 6-20 | – | – | – | – | – |
| | | CEM II/B-Q | 65-79 | – | – | – | 21-35 | – | – | – | – | – |
| | Portland Uçucu Küllü Çimento | CEM II/A-V | 80-94 | – | – | – | – | 6-20 | – | – | – | – |
| | | CEM II/B-V | 65-79 | – | – | – | – | 21-35 | – | – | – | – |
| | | CEM II/A-W | 80-94 | – | – | – | – | – | 6-20 | – | – | – |
| | | CEM II/B-W | 65-79 | – | – | – | – | – | 21-35 | – | – | – |
| | Portland Pişmiş Şistli Çimento | CEM II/A-T | 80-94 | – | – | – | – | – | – | 6-20 | – | – |
| | | CEM II/B-T | 65-79 | – | – | – | – | – | – | 21-35 | – | – |
| | Portland Kalkerli Çimento | CEM II/A-L | 80-94 | – | – | – | – | – | – | – | 6-20 | – |
| | | CEM II/B-L | 65-79 | – | – | – | – | – | – | – | 21-35 | – |
| | | CEM II/A-LL | 80-94 | – | – | – | – | – | – | – | – | 6-20 |
| | | CEM II/B-LL | 65-79 | – | – | – | – | – | – | – | – | 21-35 |
| | Portland Kompoze Çimento | CEM II/A-M | 80-94 | 12-20 | | | | | | | | |
| | | CEM II/B-M | 65-79 | 21-35 | | | | | | | | |
| CEM III | Yüksek Fırın Cüruflu Çimento | CEM III/A | 35-64 | 36-65 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | | CEM III/B | 20-34 | 66-80 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | | CEM III/C | 5-19 | 81-95 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| CEM IV | Puzolanik Çimento | CEM IV/A | 65-89 | – | 11-35 | | | | | – | – | – |
| | | CEM IV/B | 45-64 | – | 36-55 | | | | | – | – | – |
| CEM V | Kompoze Çimento | CEM V/A | 40-64 | 18-30 | – | 18-30 | | | – | – | – | – |
| | | CEM V/B | 20-38 | 31-49 | – | 31-49 | | | – | – | – | – |

**A:** Çimentonun en az mineral katkı içeren tipi

**B:** Çimentonun A tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi

[1] Tüm çimento tipleri kütlece %0-5 oranında minör ilave bileşenler içerebilir.

**C:** Çimentonun B tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi

**L:** Organik karbon içeriği %0.5'ten az olan kalker

**LL:** Organik karbon içeriği %0.2'den az olan kalker

TS EN 197-1 Standardı'nda yer alan çimento mineral katkıları aşağıda açıklanmıştır [46]:

**Yüksek Fırın Cürufu (S):** Yüksek fırında demir üretimi sırasında oluşan cürufun ani olarak soğutulmasıyla elde edilen ve başlıca $SiO_2$, CaO, MgO ve $Al_2O_3$'den oluşan bir yan üründür.

**Silis Dumanı (D):** Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle indirgenmesinden oluşan amorf $SiO_2$'e silis dumanı denir. Silis dumanı kütlesel olarak en az %85 amorf $SiO_2$ içerir.

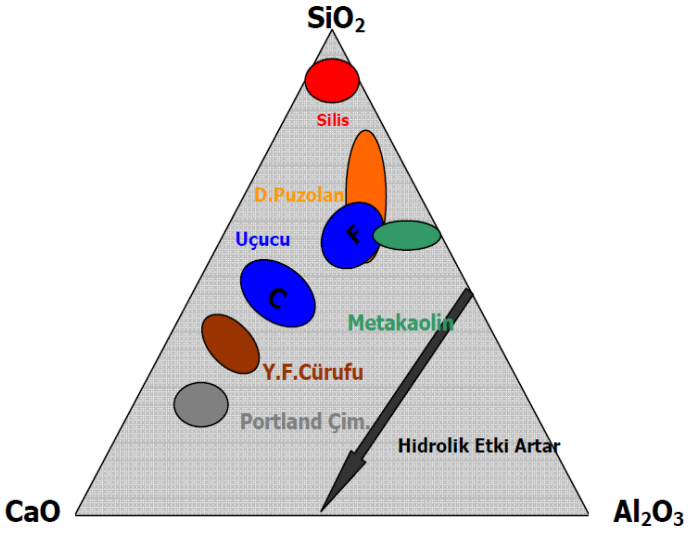
**Doğal Puzolanlar (P, Q):** Puzolanlar tek başlarına su ile reaksiyona girmemelerine rağmen ince olarak öğütüldüklerinde su ve $Ca(OH)_2$ ile normal sıcaklıkta reaksiyona girerek, kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat oluşturarak dayanım kazanan maddelerdir. Bu maddeler tras gibi volkanik tüfler ve tortul kayalardır ve P ile gösterilirler. Bazı durumlarda doğal puzolanlar ısıl işlem uygulanarak aktifleştirilirler. Isıl işlem görmüş olan puzolanlar Q ile gösterilirler. Puzolanik özellik bu maddelerin bileşimlerinde bulunan reaktif haldeki $SiO_2$'den kaynaklanmaktadır.

**Uçucu Küller (V, W):** Pulverize kömür yakılan termik santrallerde baca gazına karışan toz halindeki küllerin bacada elektrostatik olarak tutulması sonucu elde edilen toz halindeki küller, havada ani olarak soğumaları nedeniyle puzolanik özellik gösterirler. Uçucu küller silissi (V) veya kalkersi (W) yapıda olabilir. Silissi uçucu küllerin (V) bileşiminde reaktif $SiO_2$ oranı kütlesel olarak %25'ten fazla ve reaktif CaO oranı %10'dan az olmalıdır. Kalkersi uçucu kül (W) bileşiminde reaktif $SiO_2$ oranı kütlesel olarak %25'ten fazla ve reaktif CaO oranı %10'dan fazla olmalıdır.

**Pişmiş Şist (T):** Doğal şistlerin fırında yaklaşık 800°C'a kızdırılmasıyla elde edilir. Pişmiş şistlerin bileşiminde şistin doğal haldeki mineralojik yapısına bağlı olarak dikalsiyum silikat ve monokalsiyum alüminat gibi klinker bileşenleri ve puzolonik reaksiyona girebilen $SiO_2$'de bulunur.

**Kalker (Kireç Taşı) (L, LL):** Toz haline getirilmiş kireç taşı klinker içine katılarak Portland kalkerli çimento üretiminde kullanılabilir.

Mineral katkıların kimyasal bileşimi Şekil 3.4'te verilmiştir.




Şekil 3.4 Mineral katkıların kimyasal bileşimi [57]

### 3.2.3 Su

Su, beton yapımında 3 farklı amaca yönelik olarak kullanılmaktadır [15]:

- Çimento ve agrega ile birlikte betonun hazırlanmasında "karışım suyu olarak",
- Yerine yerleştirilmesinden sonra priz alarak bir miktar mukavemet kazanan betonun yüzeyine uygulanan "bakım ya da kür suyu" olarak,
- Beton üretiminde kullanılacak agregaların temizlenmelerinde kullanılmak üzere "yıkama suyu" olarak.

Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun çimento ile karıştırılmasıyla hidratasyon reaksiyonları başlar. Ayrıca karışım suyu betonun karılması işleminde agrega ve çimento taneciklerinin yüzeyini ıslatarak üretilen taze beton karışımında istenilen işlenebilirliğin elde edilmesini sağlar [45].

Taze betonun sertleşmesi sürecinde içerdiği suyun buharlaşarak kaybolmasını önlemek gerekmektedir. Hidratasyon reaksiyonları için gerekli olan suyun bir kısmının buharlaşarak yapıdan uzaklaşması, hidratasyon reaksiyonlarının tam olarak gerçekleşmemesine neden olur. Bu nedenle beklenenden daha düşük dayanım sonucu elde edilir. Bu nedenle taze beton içerisindeki suyun buharlaşarak kaybolmasını engellemek amacıyla taze betonun yüzeyi sulanarak korunması sağlanır.

Beton üretiminde kullanılan agregaların temiz olmaları gerekmektedir. Agrega yüzeyinde bulunan kil topakları, silt ve organik maddeler üretilen betonun özelliklerini olumsuz yönde etkilerler. Agrega yüzeyindeki yabancı maddeler karışımın içerdiği suyun bir kısmını emerek su/çimento oranını değiştirirler ve buna bağlı olarak beton özellikleri etkilenir. Yabancı maddeler ayrıca agrega ve çimento hamuru arasında oluşan bağı da önemli ölçüde azaltırlar. Bunun sonucunda üretilen betonun dayanımı beklenenden daha düşük çıkar. Bu nedenle, beton üretiminde kullanılan agregaların yıkanarak temizlenmeleri gerekir [15, 53].

### 3.2.4 Kimyasal Katkılar

Taze ve/veya sertleşmiş betonun özelliklerini değiştirmek amacıyla karıştırma sırasında, çimento kütlesinin %5'ini geçmemek üzere beton karışımına eklenen maddelere "kimyasal katkı" adı verilmektedir. Kimyasal katkı maddeleri betonun işlenebilirliğini, priz sürelerini, kıvamını, dayanımını ve su ihtiyacını değiştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal katkı maddeleri betona karışım suyu içerisinde ilave edilebildikleri gibi doğrudan doğruya karışıma da ilave edilebilmektedirler [44, 47].

Hava sürükleyici katkılar, süper akışkanlaştırıcı katkılar, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkılar ve su geçirimsizlik katkıları beton üretiminde kullanılan başlıca kimyasal katkılardır.

#### 3.2.4.1 Hava Sürükleyici Katkılar

Hava sürükleyici katkı maddeleri, taze beton içerisindeki hava miktarını arttırarak, hava boşluklarının birbirinden ayrı olarak yaklaşık 0.20 mm çapında boşluklar halinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan ve bu boşlukların kararlılığını betonun prizi tamamlanıncaya kadar sürdüren katkı maddeleridir. Beton içerisindeki suyun donmasıyla hacminin %9 oranında artması ile çimento hamurunun veya agreganın kapiler boşluklarında ozmotik ve hidrolik basınç oluşmaktadır. Hava sürükleyici katkılar, beton içerisinde suyun donması sırasında genleşebileceği, mikroskobik boyutlarda ve birbirinden bağımsız hava kabarcıkları oluşturarak betonun donma-çözülme direncini arttırırlar. Bu nedenlerden dolayı hava sürükleyici katkılar kış aylarında beton dökümlerinde tercih edilebilmektedir [58, 59].

#### 3.2.4.2 Süper Akışkanlaştırıcı Katkılar

Süper akışkanlaştırıcı katkılar, beton karışımında kıvamı değiştirmeden gerekli su miktarının azaltılmasını sağlayan veya su miktarını değiştirmeden yayılmayı arttıran ya da bu iki etkiyi birlikte sağlayabilen kimyasal katkılardır. Bu katkılar çimento tanecikleri arasındaki çekim kuvvetlerini azaltan yüzey aktif maddelerdir ve betonun akışkanlığını arttırırlar. Süper akışkanlaştırıcı katkıların başlıca kullanılma amaçları aşağıdaki gibidir:

❖ Aynı dozaj ve su/çimento oranında betonun yayılmasını arttırmak amacıyla kullanılırlar.

❖ Aynı dozaj ve yayılma değerinde su/çimento oranını azaltmak amacıyla kullanılırlar.

❖ Aynı su/çimento oranında mukavemeti azaltmadan daha az çimento kullanmak amacıyla kullanılırlar [46].

#### 3.2.4.3 Priz Hızlandırıcı/Geciktirici Katkılar

Priz hızlandırıcı katkılar, beton karışımının priz başlama süresini kısaltan kimyasal katkılardır. Aşırı soğuk (<5°C), yüksek rutubetli (>%80) ve sert rüzgarlı (>25 km/s) ortamlardaki beton üretiminde kullanılırlar. Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, özellikle soğuk hava şartlarında taze betonun hidratasyonunu hızlandırarak daha çabuk priz almasını sağlamaktadırlar. Priz hızlandırıcı katkılar, ilave edildikleri beton karışımlarında çimento ve su arasındaki reaksiyonu hızlandırarak, agregayı bağlayan jel oluşum hızını arttırırlar ve buna bağlı olarak hidratasyon ısısının açığa çıkması nedeniyle soğuk havalarda betonun don etkisinden korunmasına yardımcı olurlar.

Priz geciktirici katkılar, beton karışımlarının priz başlama süresini uzatan kimyasal katkılardır. Aşırı sıcak (>30°C), düşük rutubetli (<%40) ve sert rüzgarlı (>25 km/s) ortamlardaki beton üretiminde kullanılırlar. Priz geciktirici katkılar, taze betonun hidratasyon reaksiyonlarını yavaşlatarak, betonun priz başlangıç süresini uzatmak amacıyla özellikle sıcak hava şartlarında kullanılırlar. Ayrıca sıcak havalarda betonun işlenebilirlik süresini arttırarak, yerleştirme ve yüzey bitirme işlemlerini kolaylaştırırlar [60].

#### 3.2.4.4 Su Geçirimsizlik Katkıları

Su geçirimsizlik katkıları, sertleşmiş betonun su geçirgenliğini (kılcal su emmesini) azaltmak amacıyla taze betona ilave edilen katkı maddeleridir. Geçirimsizlik, betonun sıkıştırılması ile beton yapısındaki kılcal boşlukların azaltılması yoluyla elde edilir. Bu amaçla, beton boşluklarında bulunan doygun kireç ile reaksiyona girerek çözünmeyen bileşikler oluşturan katkı maddeleri kullanılır. Su geçirimsizlik katkıları kullanıldıkları karışımların kılcal su geçirimsizlik özelliğini iyileştirirler ve geçirimliliğin azaltılması ile doğrudan suyla temasta olan veya ıslak ortamda bulunan betonların uzun dönem dayanıklılığını arttırırlar [46, 60].

### 3.3 Betonların Sınıflandırılması

Beton sınıflandırması birim hacim kütlesi, dayanım, kıvam ve maksimum agrega tane büyüklüğüne göre olmak üzere farklı şekillerde yapılmaktadır.

Çizelge 3.4 Birim hacim kütlesine göre beton sınıfları [46]

| **Beton Sınıfı** | **Birim Hacim Kütlesi (kg/m$^3$)** |
|---|---|
| Hafif Beton | ≤2000 |
| Normal Ağırlıklı Beton | 2000<Birim hacim kütlesi≤2600 |
| Ağır Beton | >2600 |

Çizelge 3.4'de görüldüğü gibi birim hacim kütlesi 2000 kg/m$^3$'ten küçük olan betonlar hafif beton, birim hacim kütlesi 2000-2600 kg/m$^3$ olan betonlar normal ağırlıklı beton ve birim hacim kütlesi 2600 kg/m$^3$'ten büyük olan betonlar ağır beton olarak sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 3.5'de verilmiş olan dayanımına göre yapılan beton sınıflandırmasında, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan standart deney silindirlerinin 28 gün sonundaki dayanımı dikkate alınır. Beton karakteristik basınç dayanımı $f_{ck}$, denenecek silindirlerden elde edilecek basınç dayanımıdır. Gerektiğinde basınç dayanımı, küp deneylerinden de elde edilebilir. Böyle durumlarda, karakteristik basınç dayanımı $f_{ck}$, geçerliliği deneylerle kanıtlanmış katsayılarla dönüştürülür [61].

Çizelge 3.5 Beton sınıfları ve dayanımları (TS 500) [61]

| **Beton Sınıfı** | **Karakteristik Basınç Dayanımı, $f_{ck}$ (MPa)** | **Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı (MPa)** | **Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, $f_{ctk}$ (MPa)** |
|---|---|---|---|
| C16 | 16 | 20 | 1.4 |
| C18 | 18 | 22 | 1.5 |
| C20 | 20 | 25 | 1.6 |
| C25 | 25 | 30 | 1.8 |
| C30 | 30 | 37 | 1.9 |
| C35 | 35 | 45 | 2.1 |
| C40 | 40 | 50 | 2.2 |
| C45 | 45 | 55 | 2.3 |
| C50 | 50 | 60 | 2.5 |

Betonlar basınç dayanımlarına göre de üç ana gruba ayrılmaktadır (Çizelge 3.6):

Çizelge 3.6 Dayanımlarına göre beton sınıfları [62]

| **Beton Sınıfı** | **Dayanım (MPa)** |
|---|---|
| Düşük Dayanımlı Beton | <20 |
| Normal Dayanımlı Beton | 20<Dayanım≤40 |
| Yüksek Dayanımlı Beton | >40 |

TS EN 206'da betonların kıvamına göre yapılan sınıflandırmaya göre belirlenen çökme ve yayılma sınıfları Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Çökme sınıfları (TS EN 206) [63]

| Sınıf | Çökme (mm) |
|---|---|
| S1 | 10-40 |
| S2 | 50-90 |
| S3 | 100-150 |
| S4 | 160-210 |
| S5 | ≥220 |

Çizelge 3.8 Yayılma sınıfları (TS EN 206) [63]

| Sınıf | Yayılma Çapı (mm) |
|---|---|
| F1 | ≤340 |
| F2 | 350-410 |
| F3 | 420-480 |
| F4 | 490-550 |
| F5 | 560-620 |
| F6 | ≥630 |

Betonda kullanılan agreganın maksimum tane boyutu esas alınarak betonlar 4 sınıfa ayrılmışlardır (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9 Maksimum agrega tane boyutuna göre beton sınıfları [46]

| Beton Sınıfı | Beton Agregası | $D_{max}$ |
|---|---|---|
| No 1 | D1 | 12 mm |
| No 2 | D2 | 22 mm |
| No 3 | D3 | 32 mm |
| No 4 | D4 | 64 mm |

## 3.4 Betonun Özellikleri

İşlenebilirlik, mukavemet, sünme, rötre ve termal özellikler betonun önemli fiziksel özellikleridir [46].

### 3.4.1 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik; taze betonun taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri sırasında homojenliğini kaybetmeden yapısını koruması olarak tanımlanmaktadır. Betonun işlenebilirliği sadece betonun içerdiği su miktarına göre değerlendirilmemelidir. Agregaların ve çimentonun özellikleri, karışım oranları ve beton karışımının hazırlandığı ortam koşulları da betonun işlenebilirliğini etkilemektedir. Çimentonun ve ince agreganın miktarının arttırılması ve kaba agreganın miktarının azaltılması betonun işlenebilirliğini arttırmaktadır.

### 3.4.2 Mukavemet

Beton mukavemetini etkileyen faktörler; agrega cinsi ve granülometrisi, çimento cinsi ve miktarı, su/çimento oranı ve beton kompasitesidir. Ayrıca betonun döküldüğü koşullar ve kürlenmesi de beton mukavemetini etkiler.

Beton üretiminde kullanılan kaba agrega ve ince agrega miktarlarının ve tane dağılımının minimum boşluk yüzdesini sağlayacak şekilde seçilmiş olması gerekmektedir. Betonun taşınması ve yerleştirilmesi sürecinde de bu dengenin bozulmaması için betonun işlenebilirlik özelliğine dikkat edilmesi gerekir.

Betonun mekanik mukavemeti yanında dış çevreden gelen çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere karşı da dayanıklı olması gerekmektedir. Betonun çevresel etkilere karşı mukavemetini belirleyen en önemli özelliği kompasitedir. Kompasite, beton içerisindeki katı maddelerin kapladığı hacmin, betonun kapladığı gerçek görünür hacme oranıdır. Porozite ise, beton içerisindeki su ve hava tarafından doldurulan boşluk hacminin, betonun toplam hacmine oranıdır. Porozite azaldıkça kompasite artar. Normal betonların kompasitesi genellikle 0.80'den büyüktür. Kompasite arttıkça beton mukavemeti de artmaktadır.

### 3.4.3 Sünme

Sünme, yük altındaki elastik olmayan deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Sünme iç boşlukların daralması sonucu oluşur. Sünme ve betonun kuruması sırasında meydana gelen rötre aynı anda meydana gelir. Beton yapı üzerine taşıyabileceği maksimum yükten daha küçük bir yük uygulandığında çok kısa bir süre için belli bir miktar deformasyon oluşur. Bu deformasyon elastik deformasyon olarak adlandırılır ve yük kaldırıldıktan sonra beton eski haline döner. Eğer sabit yük uzun süre uygulanırsa deformasyonda yavaş fakat sürekli bir artış gözlenir. Yük altında zamanla meydana gelen bu plastik deformasyona sünme denir.

### 3.4.4 Rötre

Betonun dökümünden sonraki günlerde, betonda görülen hacim küçülmesi rötre olarak tanımlanmaktadır. Rötre temel olarak su kaybından dolayı meydana gelmektedir. Taze betonda erken dönemde büyük oranda rötre meydana gelmektedir. Taze beton henüz plastik kıvamda iken beton içerisindeki suyun bir kısmı yüzeyde toplanır ve yüzeyde toplanan su kısa sürede buharlaşır. Suyun bir kısmı da hidratasyon reaksiyonları nedeniyle kimyasal olarak bağlanır. Böylece kısa süre içinde büyük miktarda su kaybedilmiş olur.

Taze betonda karışımın hazırlanmasından itibaren birkaç saat içinde meydana gelen rötre plastik rötre olarak adlandırılır. Plastik rötre sonucu beton yüzeyinde örümcek ağına benzer gelişigüzel çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar betonun iç kısmına ulaşamadıkları için plastik rötrenin beton mukavemeti üzerinde zararlı etkisi bulunmamaktadır. Betonun sertleşmesi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda su harcanması ve beton yapısındaki kapiler boşlukların içerisindeki suyun buharlaşması sonucu oluşan rötreye de kuruma rötresi adı verilir.

Su/çimento oranı ve agrega/çimento oranı, çimento cinsi ve miktarı, ince malzeme oranı, sıcaklık ve rüzgar gibi çevre koşulları rötre oluşumunu etkileyen faktörlerdir.

### 3.4.5 Termal Özellikler

Özgül ısı, termal genleşme ve ısı iletkenliği betonun önemli termal özellikleridir.

**Özgül Isı:** Beton özgül ısısı; 1 kg betonun sıcaklığını 1°C arttırmak için verilmesi gereken ısı miktarıdır. Betonda kullanılmış olan agrega cinsi ve miktarı beton özgül ısısını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu değer normal sıcaklıklarda 0.22-0.24 kcal/kg aralığında değişmektedir. Sıcaklık arttıkça beton özgül ısısında da artış olur.

**Termal Genleşme:** Beton sıcaklıkla genleşir. Genel olarak beton sıcaklığı 1°C arttırıldığında boyutlarında $10\times10^{-6}$ oranında artış olur. Betonun bileşiminde bulunan agreganın cinsi betonun termal genleşme katsayısını önemli ölçüde etkiler. Ayrıca betonun rutubet derecesi de termal genleşmesi üzerinde etkilidir.

**Isı İletkenliği:** Isı iletkenliği; kenar uzunlukları 1 metre olan beton küpün karşılıklı iki yüzü arasında sıcaklığın 1°C düşmesi durumunda 1 saniyede geçen ısı miktarıdır. Betonun ısı iletkenlik katsayısı, betonun yapısındaki agrega cinsine, beton porozitesine ve rutubet yüzdesine bağlıdır. %50 rutubetli ortamda kalkerli agrega ile üretilmiş betonun ısı iletim katsayısı 1.7 Watt/mK iken, aynı rutubet oranında silisli agrega ile üretilmiş betonun ısı iletim katsayısı 2.2 Watt/mK'dir.

### 3.5 $MgSO_4$ Durabilitesi

Su içerisinde çözünmüş olarak beton yapısına karışan sülfat iyonlarının iki etkisi bulunmaktadır. Birincisi, $MgSO_4$'ın beton boşluklarında doygun çözelti olarak bulunan kalsiyum hidroksit ile tepkimesi sonucu oluşan kalsiyum sülfattan kaynaklanmaktadır.

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 \rightarrow CaSO_4 + Mg(OH)_2 \qquad (3.14)$$

(3.14)'de verilen reaksiyon sonucu oluşan $Mg(OH)_2$'in çözünürlüğü az olduğundan çökelir. $CaSO_4$ ise iki mol su ile birleşerek kristal hale gelir ve yaklaşık %15 oranında hacim genleşmesine neden olur.

İkinci etki olarak, su içerisinde çözünmüş olarak bulunan $MgSO_4$, klinker bileşiği kalsiyum silikat hidratlar ile reaksiyona girerek onları ayrıştırır.

$$3MgSO_4 + 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 8H_2O \rightarrow 3CaSO_4{\cdot}2H_2O + 3Mg(OH)_2 + 2SiO_2{\cdot}H_2O \qquad (3.15)$$

(3.15)'de verilen reaksiyon sonucunda, hem oluşan kalsiyum sülfatın kristallenmesi ile hacim genleşmesi meydana gelir, hem de kalsiyum silikat hidratın ayrışması ile mukavemet kaybı gerçekleşir.

Sülfatın beton üzerindeki asıl zararlı etkisi, $CaSO_4$ ile klinker bileşiği olan $C_3A$ arasında gerçekleşen reaksiyondur.

$$3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}12H_2O + 3CaSO_4 + 19H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}31H_2O \quad (3.16)$$

(3.16)'da verilen reaksiyon sonucunda oluşan ve 31 mol kristal su içeren trikalsiyum sülfoalüminat (Candlot tuzu) mukavemeti olmayan bir bileşiktir ve beton içerisinde %227 oranında hacim genleşmesine neden olur. Böylece betonun şişerek çatlamasına ve parçalanmasına neden olmaktadır.

Sülfat korozyonu, betonun içerdiği $C_3A$ miktarına ve sülfat konsantrasyonuna bağlıdır [46].

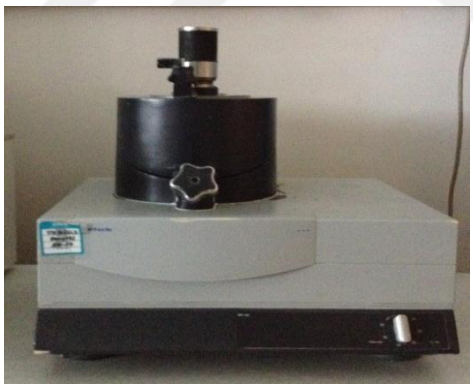
# BÖLÜM 4

# DENEYSEL YÖNTEM

## 4.1 Hammaddelerin Temini ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda borjips, klinker, standart kum, çeşitli kimyasal katkılar ve $MgSO_4$ kullanılmıştır.

Borjips, Eti Maden Bandırma Bor ve Asit Fabrikası'ndan temin edilmiştir ve sırasıyla kırma, öğütme (Şekil 4.1) ve eleme aşamalarından geçirilerek deneylerde kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Retsch agat havan



Şekil 4.2 Borjipsin öğütme öncesi ve sonrası

Çimento harcı üretiminde kullanılan klinker (Şekil 4.3), Akçansa Çimento'dan temin edilmiştir ve herhangi bir ön işlem uygulanmadan çalışmalarda kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Klinker

Çalışmalarda kullanılan standart kum Limak Çimento'dan temin edilmiştir herhangi bir ön işlem uygulanmadan çalışmalarda kullanılmıştır.

Hava sürükleyici (Micro Air® 200), priz hızlandırıcı (MasterSet® AC 326B) ve süper akışkanlaştırıcı (Master Glenium® 51) katkılar Basf'den temin edilmiştir.

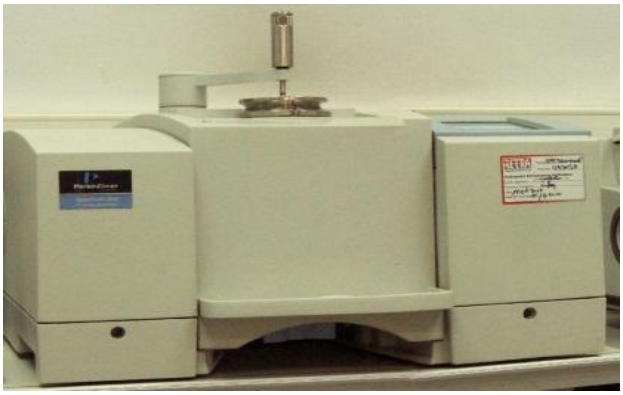
Deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin karakterizasyon çalışmaları Şekil 4.4'de verilen Philips PANalytical X-Işını Kırınım (XRD) cihazında 45 kV ve 40 mA parametrelerinde Cu-Kα tüpünde elde edilen X-ışınlarıyla yapılmıştır.



Şekil 4.4 X-ışını kırınım cihazı (XRD)

Yapılan çalışmalarda Perkin Elmer marka Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) (Şekil 4.5) ile tarama sayısı 4 ve çözünürlüğü 4 $cm^{-1}$ olarak 1800-650 $cm^{-1}$ ölçüm

aralığında, kızıl ötesi bölge altında hammaddelerin kendilerine ait özel bantları tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi (FT-IR) cihazı

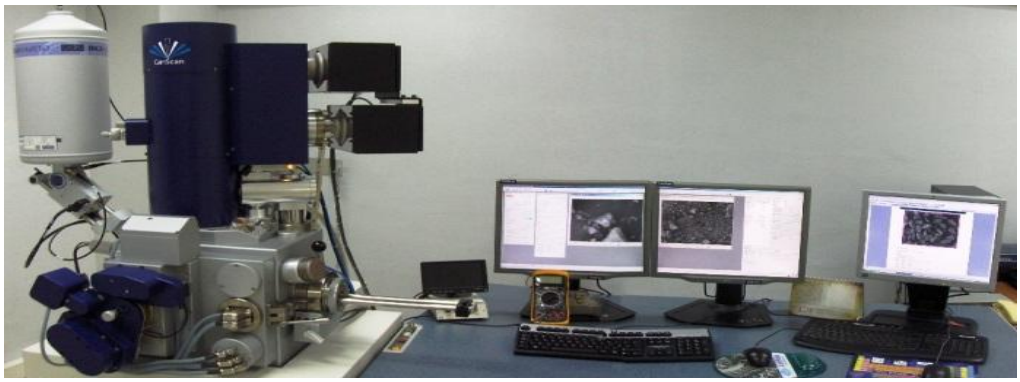
Hammaddelerin içerdikleri elementleri belirlemek amacıyla Philips PANalytical Minipal 4 X-Işını Floresans Spektrometresinde (XRF) (Şekil 4.6), silikon detektör ile 4-30 kV arasında analizler yapılmıştır.



Şekil 4.6 X-Işını floresans spektrometresi (XRF)

Borjipsin ısıl etki altındaki davranışlarını incelemek üzere Perkin Elmer Diamond DTA-TG cihazı kullanılarak termal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde ısıtma hızı 10°C/dakika olarak seçilmiştir ve bir ile eşzamanlı olarak $N_2$ gazı ortamında 1000°C'ye kadar çıkılmıştır.

CamScan Apollo 300 marka Field-Emission Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (Şekil 4.7) kullanılarak ve analizler 20 kV'de gerçekleştirilerek hammaddelerin yüzey yapıları incelenmiştir.



Şekil 4.7 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Borjipsin içerdiği bor oranı İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) kullanılarak belirlenmiştir. Mikrodalga çözümlendirme yöntemi kullanılarak çözümlendirilmiş numunelerin içerdiği bor oranı belirlenmiştir.

## 4.2 Agrega Deneyleri

### 4.2.1 Tane Yoğunluğu Tayini

Deneylerde kullanılan hammaddelerin yoğunlukları Le Chatelier balonu (Şekil 4.8) kullanılarak belirlenmiştir. Le Chatelier balonu gaz yağı ile 0-1 ml arasında bir noktaya kadar doldurulmuştur ve balon sıcaklığı 20±3°C olan su banyosu içine daldırılmıştır. Balon içindeki gaz yağının sıcaklığı sabitlenince gaz yağının hacmi okunmuştur ($V_1$) ve kaydedilmiştir. Miktarı bilinen malzeme balon içerisine koyulmuştur ve şişenin kapağı kapatılmıştır. Balon kendi ekseni etrafında döndürülerek malzeme tozları ile karışan havanın dışarıya çıkması sağlanmıştır. Hava kabarcıkları tamamen uzaklaştırıldıktan sonra balon tekrar su banyosu içine konularak deney başlangıç sıcaklığına gelmesi için beklenmiştir. Daha sonra balondaki sıvı seviyesi gözlenerek hacim yeniden okunmuştur ($V_2$). Malzemelerin yoğunluğu (4.1) eşitliği ile hesaplanmıştır.

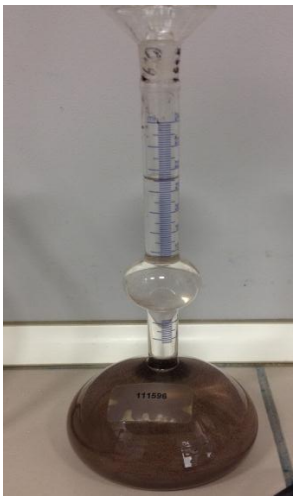
$$\rho=m/(V_2-V_1) \quad (4.1)$$

ρ: Malzemenin yoğunluğu ($g/cm^3$)

m: Malzemenin kütlesi (g)

$V_1$: İlk okunan hacim ($cm^3$)

$V_2$: Son okunan hacim ($cm^3$)



Şekil 4.8 Le Chatelier balonu

### 4.2.2 Özgül Yüzey Alanı Tayini

Borjips ve klinkerin özgül yüzey alanları Blaine Metodu kullanılarak belirlenmiştir. TS EN 196-6 Standardı'na [64] uygun olarak yapılan analizlerde borjips ve klinkerin inceliği ölçülmüştür. Blaine Metodu ile yapılan analizlerde malzemelerin inceliği, belirlenmiş boyutlarda ve porozitedeki sıkıştırılmış malzeme yatağından sabit hava miktarının geçtiği sürenin ölçülmesi esasına dayanılarak belirlenir. Özgül yüzey alanının belirlenmesinde kullanılan deney aleti Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Blaine metodu deney aleti

### 4.2.3 Kızdırma Kaybı Tayini

Deneylerde kullanılan hammaddelerin içerdiği $CO_2$, kurutma sırasında buharlaşmayan su ve diğer uçucu bileşenlerin oranını belirlemek amacıyla kızdırma kaybı tayini yapılmıştır. Öğütülmüş hammaddelerden yaklaşık 2 gram, önceden darası alınmış krozeye tartılmıştır. Kroze sıcaklığı 1000°C olan fırına koyulmuştur ve 2 saat boyunca bekletilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığına soğutulan krozeler tartılmıştır ve (4.2) eşitliği kullanılarak kızdırma kayıpları belirlenmiştir.

$$\text{Kızdırma kaybı (\%)} = (m_1-m_2)/m_1 \quad (4.2)$$

$m_1$: Deney numunesi kütlesi (g)

$m_2$: Kızdırılmış deney numunesi kütlesi (g)

### 4.2.4 Su Emme Oranı Tayini

Borjipsin su emme oranını belirlemek amacıyla su emme deneyi uygulanmıştır. Bu amaçla borjips, 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra tava içerisine yayılarak doygun kuru yüzey haline gelmesi sağlanmıştır. Doygun kuru yüzey haline gelmiş borjips tartılarak etüve koyulmuştur ve etüv kurusu haline gelmesi sağlanmıştır. Etüv kurusu haline gelmiş borjips tartılmıştır ve Eşitlik (4.3) yardımıyla su emme oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme oranı (\%)} = [(M_2-M_1)/M_1]\times 100 \quad (4.3)$$

$M_1$: Etüv kurusu ağırlık (g)

$M_2$: Doygun kuru yüzey ağırlığı (g)

### 4.2.5 Boyut Analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılan borjips, klinker ve kumun tane boyut dağılımını belirlemek amacıyla elek analizi uygulanmıştır. Elek analizi Şekil 4.10'da verilen Fritsch marka elek sarsma makinesi ile yapılmıştır ve granülometri eğrileri çizilmiştir.



Şekil 4.10 Elek sarsma makinesi

### 4.2.6 Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği

Agregalarda sülfat içeriğinin yüksek olması durumunda betonda etrenjit oluşumu görülür. Etrenjit oluşumu betonun zamanla genleşmesi ve çatlaması gibi problemlere neden olur. Asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi TS EN 1744-1 Standardı'na [65] göre yapılır. Deney sonucuna, TS 706 EN 12620 Beton Agregaları Standardı'na [66] göre kategori verilir.

Borjipsin asitte çözünebilir sülfat içeriğinin belirlenmesi amacıyla 0.125 mm elekten geçen 20 gramlık numuneden 2 gram alınarak 105°C'de kurutulmuştur. Kurutulan numune tartılarak 250 ml'lik behere koyulmuştur ve üzerine 90 ml soğuk su ilave edilmiştir. Karışım kuvvetlice karıştırılırken, 10 ml derişik HCl ilave edilmiştir. Çözelti ısıtılarak cam karıştırma çubuğu ile katılar dağılacak şekilde karıştırılmıştır. Çözelti, 15 dakika boyunca kaynama noktasının hemen altında tutulmuştur ve beherdeki numune orta dereceli süzgeç kağıdından süzülmüştür. Süzgeç kağıdı üzerindeki kalıntı sıcak su ile yıkanmıştır. Süzüntü hacmi 250 ml'ye ayarlanmıştır ve süzüntü 5 dakika kaynatılmıştır. Kaynama noktasının hemen altına ısıtılmıştır ve 10 ml $BaCl_2$ çözeltisi damla damla ilave edilmiştir. $BaCl_2$ ilavesi ile beyaz renkte $BaSO_4$ çökeleği oluşmuştur. Çözelti ılık ortamda bir gece bekletildikten sonra iyi dereceli süzgeç kağıdı ile süzülmüştür ve filtre kağıdı krozeye alınmıştır; 110±5°C'deki kül fırınında 30 dakika kurutulduktan sonra sıcaklık 925±25°C'ye kademeli olarak yükseltilerek, filtre kağıdı bu

sıcaklıkta 15 dakika tutulmuştur. Kroze desikatörde soğutulmuştur ve 0.1 mg yaklaşımla tartılmıştır. Krozenin kütlesindeki artıştan çökeleğin kütlesi $m_2$ hesaplanmıştır. Deney sonucu (4.4) denkliği kullanılarak hesaplanmıştır:

Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği (%$SO_3$): $(m_1/m_2)\times 34.3$ (4.4)

$m_1$: Çökeleğin kütlesi (g)

$m_2$: Deney numunesinin kütlesi (g)

### 4.2.7 Suda Çözünebilir Klorür İçeriği

Agregalarda suda çözünebilir klorür TS EN 1744-1 Standardı [65] 7. maddesinde belirtilen deney metoduna göre yapılmaktadır. Agregalarda klorür içeriği çelik donatılı yapılarda korozyona neden olması nedeniyle oldukça önemlidir.

Borjipsin suda çözünebilir klorür içeriğinin belirlenmesi amacıyla borjips 110±5°C'ye kadar kurutularak sabit tartıma getirilmiştir ve yaklaşık 500±75 g olan 2 adet deney numunesi elde edilmiştir. 2 litre kapasiteli 2 adet şişe tartılarak kütleleri kaydedilmiştir. Deney numuneleri şişelere koyulmuştur ve bu şekilde tartılmıştır, her bir şişedeki agrega kütlesi aradaki farktan hesaplanmıştır. Her bir şişeye deney numunesi kütlesine eşit kütlede su ilave edilmiştir ve şişeler 60 dakika boyunca bir çalkalayıcıda karıştırılmışlardır. Ekstraktlar orta gözenekli süzgeç kağıdından en az 100 ml berrak veya yarı berrak bir süzüntü toplanıncaya kadar bir behere süzülmüşlerdir. 100 ml süzülmüş ekstrakt 250 ml'lik bir erlene aktarılmıştır. Erlene 5 ml $HNO_3$ ilave edilerek bütün klorürler çökene kadar gümüş nitrat çözeltisi ve biraz fazlası ilave edilmiştir. 2 ml 3,5,5-trimetilhekzan-1-ol ilave edilerek çökelek oluşması için erlen kuvvetle çalkalanmıştır. 5 ml amonyum demir(III)sülfat ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2\cdot 6H_2O$) indikatör çözeltisi ilavesinden sonra ayarlı tiyosiyanat ($SCN^-$) çözeltisi bir büretle ilk kalıcı renk değişimi, yani yarı berrak beyaz renk mat kahverengiye dönüşünceye kadar ilave edilmiştir. İkinci deney numunesi ekstraktı için de aynı işlemler tekrarlanmıştır. Deney sonuçları, iki ekstraktın tayinlerinin sonucunun ortalaması olarak verilmiştir. Deney sonucu (4.5) denkliği kullanılarak hesaplanmıştır:

$C = 0.003546\ W\ [V_5 - (10\times C_T\times V_6)]$ (4.5)

$V_5$: $AgNO_3$ çözeltisinin hacmi (ml)

$V_6$: İlave edilen ayarlı tiyosiyanat çözeltisinin hacmi (ml)

$C_T$: Ayarlı tiyosiyanat çözeltisinin derişimi (mol/l)

W: su/agrega oranı (gram/gram)

### 4.2.8 Toplam Kükürt İçeriği

Toplam Kükürt İçeriği deneyi TS EN 1744-1 Standardı'na [65] göre yapılmaktadır. Agreganın toplam kükürt içeriğinin belirlenmesi amacıyla, deney numunesinin içerdiği mevcut kükürt bileşiğini sülfatlara dönüştürmek için brom (Br) ve nitrik asit ($HNO_3$) ile muamele edilir. Sülfatlar $BaSO_4$ olarak çöktürülür ve tartılır. Kükürt içeriği agreganın kütlece yüzdesi olarak ifade edilmektedir.

125 mm'lik elekten geçen yaklaşık 1 g deney numunesi alınarak tartım kaydedilmiştir ve huniyle geniş ağızlı bir erlene aktarılmıştır. Erlene 3 ml su ve 1 ml brom ilave edilmiştir. Karışım, istenmeyen topaklaşma oluşumunu engellemek için hafifçe 1 dakika çalkalanmıştır ve huniyle yavaşça 15 ml kükürtsüz, derişik $HNO_3$ ilave edilmiştir. Karışım 1 saat bekletilmiştir ve aralıklı olarak oluşan jel cam çubuk ile dağıtılmıştır. 30 ml su ilave edilmiştir ve karışım bir ısıtıcı üzerinde, yoğun kahverengi dumanlar kesilene kadar hafifçe kaynatılmıştır. 5 ml derişik HCl ve 10 ml su ilave edilmiştir. Erlen içerisindeki çözelti 250 ml'lik bir behere aktarılmıştır ve beherdeki toplam hacim yaklaşık 100 ml olana kadar erlen yıkanmıştır. Az miktarda süzgeç kağıdı hamuru ilave edilerek beherin içindekiler kaynama durumuna getirilmiştir ve çözeltiye $NH_3$ ilave edilerek alkali olması sağlanmıştır. 30 saniye kaynama derecesinin biraz altına kadar kaynatılmıştır. Orta gözenekli bir süzgeç kağıdı kullanılarak vakum ile süzülmüştür ve sıcak distile su ile yıkanmıştır. Süzgeç kağıdı behere alınmıştır ve 70 ml sıcak su ilave edilerek 5 ml derişik HCl ile tekrar çözülmüştür ve çökelek ayrılmıştır. Birleştirilmiş süzüntüler asitlendirilerek 1 ml derişik HCl ile yıkanmıştır. 5 dakika kaynatılarak eş zamanlı olarak kaynama noktasındaki çözelti kuvvetlice sallanmıştır. 10 ml $BaCl_2$ çözeltisi damla damla eklenerek kaynama noktasının biraz altına kadar ısıtılmıştır ve süzülmüştür. Süzüntü madde tartılmıştır ve çökeleğin kütlesi ($m_2$) hesaplanmıştır. Deney sonucu (4.6) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

Toplam Kükürt İçeriği (%S): $(m_1/m_2)\times 13.74$ (4.6)

$m_1$: Çökeleğin kütlesi (g)

$m_2$: Deney numunesinin kütlesi (g)

### 4.3 Çimento Harçlarının Hazırlanması

Borjips, klinker ve standart kum kullanılarak farklı su/çimento oranlarında hazırlanan karışımlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. %0, 1, 3, 5, 7 ve 10 oranlarında borjipsin klinker yerine kullanıldığı karışımlar 0.50, 0.45 ve 0.40 su/binder oranları kullanılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 4.1 Hazırlanan çimento harçları

| Karışım | Klinker (g) | Borjips (g) | Kum (g) | Su (g) | Su/binder | Borjips (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K1 | 450.0 | 0.0 | 1350 | 225.0 | 0.50 | 0 |
| K2 | 445.5 | 4.5 | 1350 | 225.0 | 0.50 | 1 |
| K3 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 225.0 | 0.50 | 3 |
| K4 | 427.5 | 22.5 | 1350 | 225.0 | 0.50 | 5 |
| K5 | 418.5 | 31.5 | 1350 | 225.0 | 0.50 | 7 |
| K6 | 405.0 | 45.0 | 1350 | 225.0 | 0.50 | 10 |
| K7 | 450.0 | 0.0 | 1350 | 202.5 | 0.45 | 0 |
| K8 | 445.5 | 4.5 | 1350 | 202.5 | 0.45 | 1 |
| K9 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 202.5 | 0.45 | 3 |
| K10 | 427.5 | 22.5 | 1350 | 202.5 | 0.45 | 5 |
| K11 | 418.5 | 31.5 | 1350 | 202.5 | 0.45 | 7 |
| K12 | 405.0 | 45.0 | 1350 | 202.5 | 0.45 | 10 |
| K13 | 450.0 | 0.0 | 1350 | 180.0 | 0.40 | 0 |
| K14 | 445.5 | 4.5 | 1350 | 180.0 | 0.40 | 1 |

Çizelge 4.1 Hazırlanan çimento harçları (devamı)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K15 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 180.0 | 0.40 | 3 |
| K16 | 427.5 | 22.5 | 1350 | 180.0 | 0.40 | 5 |
| K17 | 418.5 | 31.5 | 1350 | 180.0 | 0.40 | 7 |
| K18 | 405.0 | 45.0 | 1350 | 180.0 | 0.40 | 10 |

Borjips, klinker, standart kum, hava sürükleyici, priz hızlandırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak, farklı katkı oranlarında hazırlanan karışımlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Katkı içeren karışımların tamamında, katkı kullanılmadan yapılan karışımlardaki en yüksek dayanım sonucunu veren borjips oranı olan %3'lük borjips oranı kullanılmıştır. K19, K20 ve K21 karışımları Basf Micro Air® 200 hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanmıştır. K22, K23 ve K24 karışımlarında Basf MasterSet® AC 326B priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır. K25, K26 ve K27 karışımlarında ise Basf Master Glenium® 51 süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katkı kullanılarak hazırlanan karışımlar 0.35 su/binder oranında hazırlanmıştır.

Çizelge 4.2 Katkı kullanılarak hazırlanan karışımlar

| **Karışım** | **Klinker (g)** | **Borjips (g)** | **Kum (g)** | **Su (g)** | **Katkı Miktarı (g)** | **Katkı Miktarı (%)** | **Su/binder** | **Borjips (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K19 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 0.45 | 0.10 | 0.35 | 3 |
| K20 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 0.675 | 0.15 | 0.35 | 3 |
| K21 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 0.90 | 0.20 | 0.35 | 3 |
| K22 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 4.50 | 1.00 | 0.35 | 3 |
| K23 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 6.75 | 1.50 | 0.35 | 3 |
| K24 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 9.00 | 2.00 | 0.35 | 3 |
| K25 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 1.80 | 0.40 | 0.35 | 3 |
| K26 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 2.25 | 0.50 | 0.35 | 3 |
| K27 | 436.5 | 13.5 | 1350 | 157.5 | 2.70 | 0.60 | 0.35 | 3 |

Deneysel çalışmalarda, TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları Standardı'nda [67] belirtilen çimento yerine klinker ve farklı oranlardaki borjips kullanılmış ve standartta belirtilen işlemler birebir uygulanmıştır.

Karışımlar TS EN 196-1 Standardı'na göre hazırlanmıştır. Bu standarda uygun olarak, Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilen miktarlardaki hammaddeler uygun laboratuvar şartlarında tartılmıştır. Hammaddelerin ve cihazların laboratuvar sıcaklığında olmalarına dikkat edilmiş ve tartımlar ±1 g doğrulukta terazi ile yapılmıştır. Harç karışımı için UTEST marka çimento mikseri (Şekil 4.11) kullanılarak, karıştırma işlemi mekanik olarak yapılmıştır. Karışım hazırlanırken mikser kabına ilk olarak su konulmuş ve klinker ve borjips karışımı eklenmiştir. Ardından mikser düşük hızda karıştırılmaya başlanmıştır. 30 saniye sonra kum, 30 saniye içinde sürekli olarak ilave edilmiştir. Kumun eklenmesi ile mikser yüksek hıza ayarlanarak, 30 saniye daha karıştırmaya devam edilmiştir. Mikser 1 dakika 30 saniye sonra durdurulmuş ve 15 saniye sıyırıcı ile kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç sıyrılarak kabın ortasına toplanmıştır. Daha sonra karıştırmaya yüksek hızda 60 saniye daha devam edilmiştir.




Şekil 4.11 Çimento mikseri

Hazırlanan harçlar, basma ve eğilme dayanımı deneyleri için 40×40×160 mm'lik prizmatik kalıplara doldurulmuştur. Her karışımdan 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri için numuneler kalıplanmıştır. Kalıplar, harç ile doldurulmadan önce numunelerin kalıba yapışmasını engellemek amacıyla kalıp yağı ile yağlanmıştır. Kalıba doldurma işlemi, harcın içinde hava kabarcığı kalmaması ve harcın kalıba tam yerleşmesi için UTEST

marka sarsma tablası (Şekil 4.12) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler kalıplara alınırken öncelikle kalıp ve kalıp başlığı sarsma tablasına sıkıcı tutturulmuştur. Harç ile kalıbın yarısı doldurulmuştur, bu kısım ilk tabakadır. Harç tabakası kalıba düzgün şekilde yayılmıştır. Daha sonra bu ilk tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra ikinci tabaka harç kalıbına doldurularak düzeltilmiş ve yine 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır.




Şekil 4.12 Sarsma tablası

Kalıp, sarsma tablasından kaldırılmıştır ve harcın fazlası metal bir mastarla sıyrılmıştır. Prizmaların yüzeyi, tekrardan mastarla düzleştirilmiştir.

Döküm işlemi tamamlandıktan sonra kalıpların üzeri cam levhalar ile kapatılarak, 20-25°C sıcaklıkta ve bağıl nemi %90 olan Nüve marka nem kabinine (Şekil 4.13) konulmuş ve 24 saat boyunca burada bekletilmişlerdir. Bu şekilde hidratasyon sırasında açığa çıkan ısının harç içerisindeki suyu buharlaştırması engellenmiştir.




Şekil 4.13 Nem kabini

24 saat sonunda, kalıplardan çıkarılan numuneler (Şekil 4.14) 20±1$^{o}$C sıcaklıkta olan kür havuzuna (Şekil 4.15) konmuştur. Basma ve eğilme dayanım deneyleri uygulanana (3, 7, 28. gün) kadar bu havuzda tutulmuşlardır.



Şekil 4.14 Kalıptan çıkarılan numuneler



Şekil 4.15 Kür havuzu

## 4.4 Çimento Harçlarına Uygulanan Deneyler

Hazırlanan çimento harçlarına yayılma tablası, birim ağırlık ve priz deneyleri uygulanmıştır.

### 4.4.1 Yayılma Tablası Deneyi

Hazırlanan çimento harçlarının karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kalıplara doldurulmadan önce, hazırlanan harçların işlenebilirliğini test etmek amacıyla TS EN 1015-3 Standardı'na [68] uygun olarak yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Deneylerde Şekil 4.16'da gösterilen çimento yayılma tablası kullanılmıştır. 300 mm çaplı yayılma tablasının üzerine yüksekliği 60 mm, taban çapı 100 mm ve üst çapı 70 mm olan kesik koni şeklindeki kalıp yerleştirilmiştir. Taze harçla doldurulan kalıp düzgünce

kaldırıldıktan sonra taze harç, saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez düşürülerek yayılma çapı ölçülmüştür. Yayılma öncesi ve yayılma sonrası numuneler Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16 Çimento yayılma tablası



Şekil 4.17 Yayılma deneyi öncesi ve sonrası

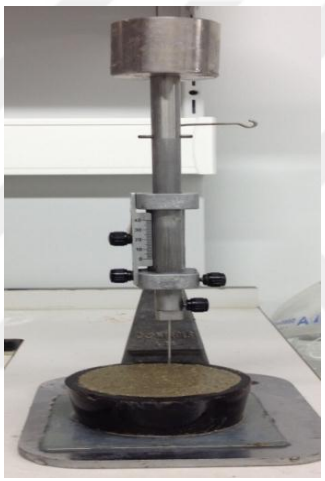
### 4.4.2 Birim Ağırlık Deneyi

Hazırlanan harçların birim ağırlıklarını belirlemek amacıyla çimento harçları hacmi bilinen bir kap içerisine yaklaşık üç eşit kademede doldurulmuştur ve sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Harcın yüzeyi düzeltildikten sonra kap içerisinde bulunan harcın net ağırlığı kap ve harç tartılarak bulunmuştur. Birim ağırlık değerleri (4.7) eşitliğine göre hesaplanmıştır:

Çimento Harcı Birim Ağırlığı=Çimento Harcı Ağırlığı/Kabın İç Hacmi (4.7)

### 4.4.3 Priz Deneyleri

Priz süresi tayinleri için karıştırma işlemi sonrasında harçlar vikat aleti kalıplarına doldurulmuştur ve bu kalıplar 20±1°C sıcaklıkta olan kür havuzuna konmuş ve belirli zaman aralıklarında Jeotest marka vikat aleti ile (Şekil 4.18) TS EN 480-2 Standardı'na [69] göre priz süresi ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler yapılırken, başlangıç zamanı (döküm anı) sıfır olarak kabul edilmiş ve bu andan itibaren iğne ile taban plakası arasındaki mesafe 4 mm oluncaya kadar geçen süre, 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. İğnenin numunenin üst kısmından ilk 2.5 mm derinliğe battığı an ile sıfır olarak kabul edilen zaman, 15 dakikaya yuvarlatılarak priz sonu süresi olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.18 Vikat aleti

## 4.5 Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri

3, 7 ve 28 gün kür havuzunda bekletilen numunelerin ilgili günlerdeki basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. Basınç ve eğilme dayanım deneyleri için UTEST marka basınç ve eğilme cihazı (Şekil 4.19) kullanılmıştır ve deneyler TS EN 196-1 Standardı'na [67] göre yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyinde, prizma kalıplar kür havuzundan alınarak deney cihazına yan yüzeylerden biri üzerine yerleştirilmiş ve tek noktadan (merkezi) yükleme metodu kullanılarak, yük 50 N/s hızında olacak şekilde prizma kırılıncaya kadar arttırılarak uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyinde ise prizma kalıplar, basınç dayanımı cihazı kullanılarak yan yüzeylerinden yükleme yapılarak deneye tabi tutulmuşlardır. Prizmalar cihazın plakaları arasına ±0.5 mm'den fazla taşmayacak ve

merkezlenecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Yük 2400 N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde prizma kırılana kadar arttırılarak uygulanmıştır. İki deneyde de kırılma anındaki değerler cihazdan okunarak kaydedilmiştir.



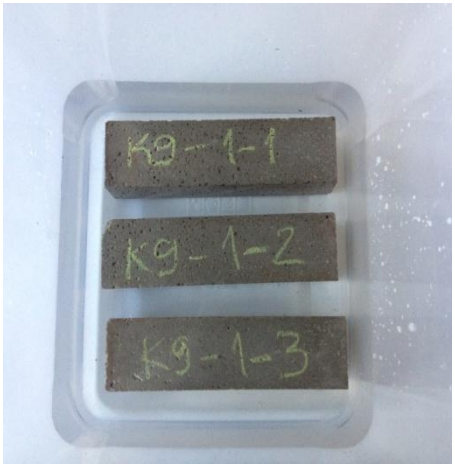

Şekil 4.19 Basınç ve eğilme dayanımı cihazı

## 4.6 Su Emme Deneyi

Nem kabininde 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılan ve kür havuzuna koyulan numunelerin su emme özelliklerini belirlemek amacıyla su emme deneyi yapılmıştır. Kür havuzunda 24 saat bekletilen numuneler, kür havuzun koyulmadan önce ve 24 saat kür havuzunda bekletildikten sonra tartılmış ve su emme oranları belirlenmiştir.

## 4.7 $MgSO_4$ Durabilite Deneyleri

En yüksek eğilme ve basınç dayanımı değerlerine ulaşılan numune olan K9 numunesi için $MgSO_4$ durabilite deneyleri uygulanmıştır. 28 gün boyunca suda kürlenen numuneler sonraki günlerde suda ve $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde kürlenmiştir. 15, 30 ve 45 gün boyunca $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde kürlenmiş numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim ve eğilme ve basınç dayanımları, eşit süre boyunca su içerisinde kürlenmiş numuneler ile karşılaştırılarak $MgSO_4$'ın harçlar üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Numuneler 0.50 M $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde kürlenmiştir (Şekil 4.20). Çözeltiler iki haftada bir değiştirilerek konsantrasyonun sabit tutulması amaçlanmıştır.




Şekil 4.20 $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde kürlenen numuneler

## 4.8 XRD Analizleri

28 gün suda kürlendikten sonra dayanımı ölçülen numunelerin yapısını incelemek amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Analizler 45 kV ve 40 mA parametrelerinde Cu-Kα tüpünde elde edilen X-ışınlarıyla yapılmıştır. Dayanımı ölçüldükten sonra elde edilen numuneler öğütülerek analizler gerçekleştirilmiştir. $MgSO_4$ durabilitesi deneyleri için hazırlanan ve belirli süre $MgSO_4$ çözeltisinde ve suda kürlenmiş numunelerinde karakterizasyonu XRD ile yapılmıştır.

# BÖLÜM 5

# DENEYSEL SONUÇLAR

## 5.1 Hammaddelerin Karakterizasyon Sonuçları

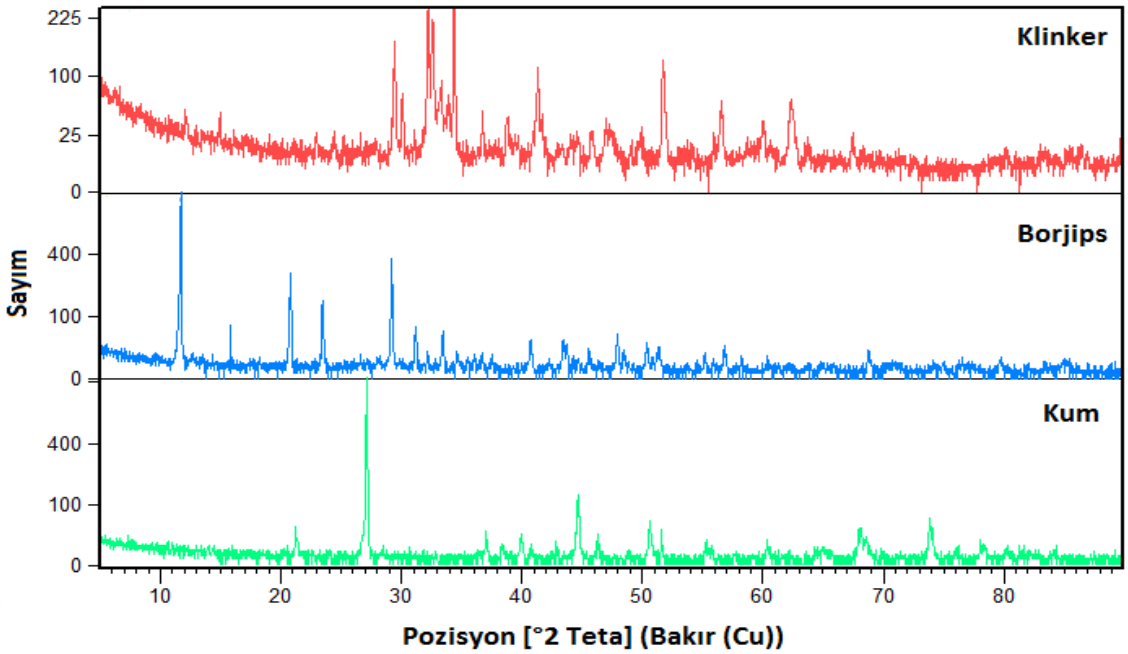
Deneysel çalışmalarda kullanılan borjips, klinker ve kuma ait XRD sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Hammaddelerin XRD sonuçları

| Hammadde | Pdf # | Mineral İsmi | Mineral Formülü | XRD Skoru |
|---|---|---|---|---|
| Borjips | 00-006-0046 | Jips | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | 69 |
| Klinker | 00-042-0551 | Kalsiyum Silikat | $Ca_3SiO_5$ | 67 |
| | 00-023-1009 | Alüminyum Oksit | $Al_2O_3$ | 12 |
| Kum | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 36 |

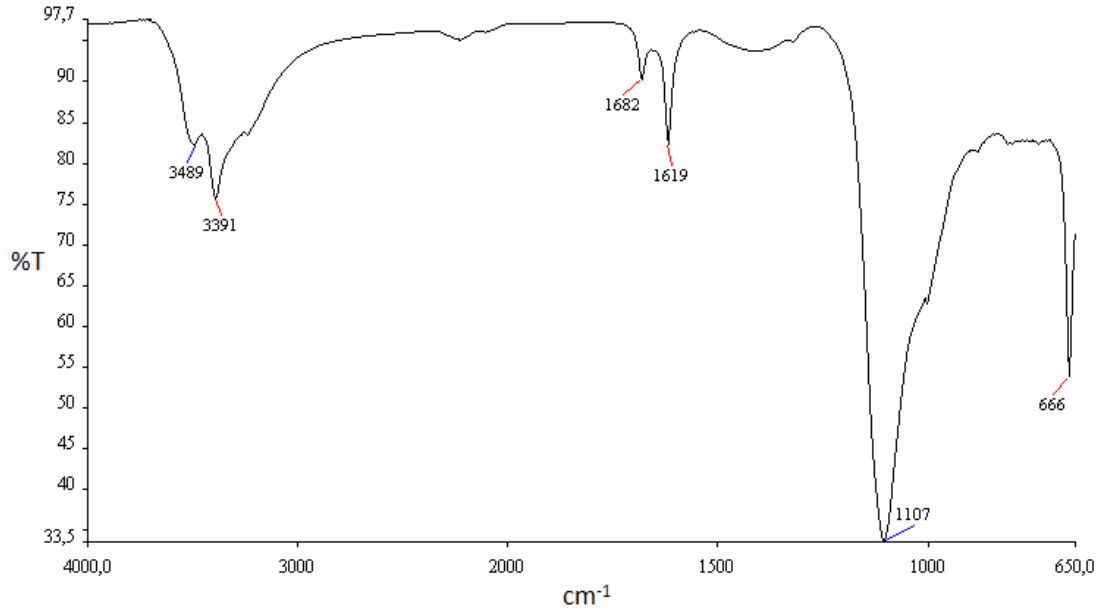
Yapılan XRD analizi sonucunda borjipsin kristal kafes yapısının 00-006-0046 pdf (powder diffraction file) kodlu jips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ile eşleştiği görülmüş ve kristal skoru 69 olarak belirlenmiştir. Klinkerin yapısında 00-042-0551 pdf kodlu kalsiyum silikat ($Ca_3SiO_5$) ve 00-023-1009 pdf kodlu alüminyum oksit ($Al_2O_3$) bulunduğu belirlenmiştir. Bu bileşiklerin kristal skorları sırasıyla 67 ve 12'dir. Kumun kafes yapısının ise 00-046-1045 pdf kodlu kuartz ($SiO_2$) ile eşleştiği belirlenmiştir.

Hammaddelere ait XRD paternleri Şekil 5.1'de verilmiştir.



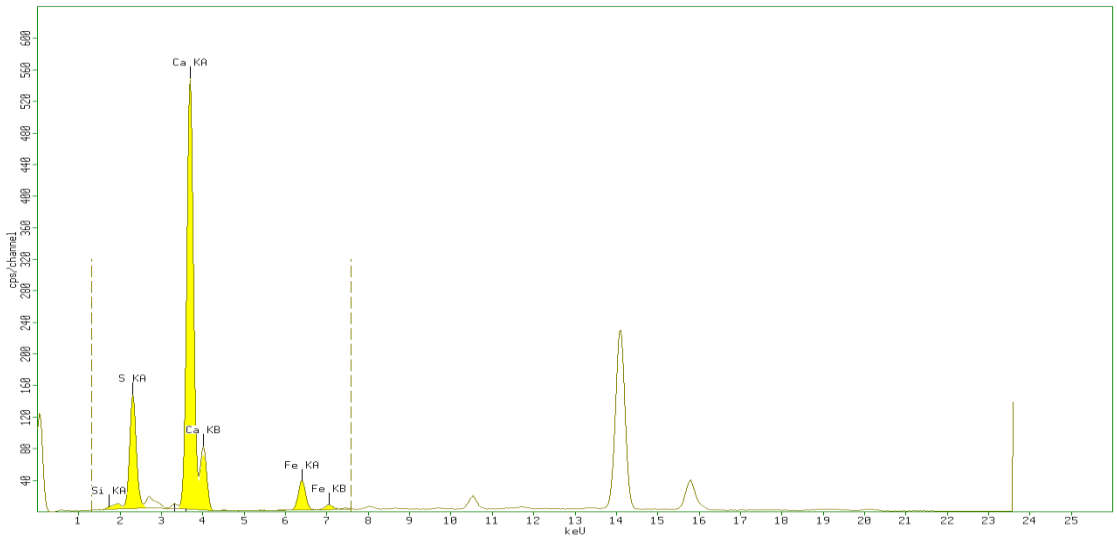

Şekil 5.1 Hammaddelere ait XRD paternleri

Borjipse ait FT-IR spektrumu Şekil 5.2'de verilmiştir. FT-IR spektrumu incelendiğinde borjipsin karakteristik piklerine rastlanmıştır.




Şekil 5.2 Borjipsin FT-IR spektrumu

Borjips, klinker ve kuma ait XRF analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiştir. XRF grafikleri ise sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de verilmiştir.

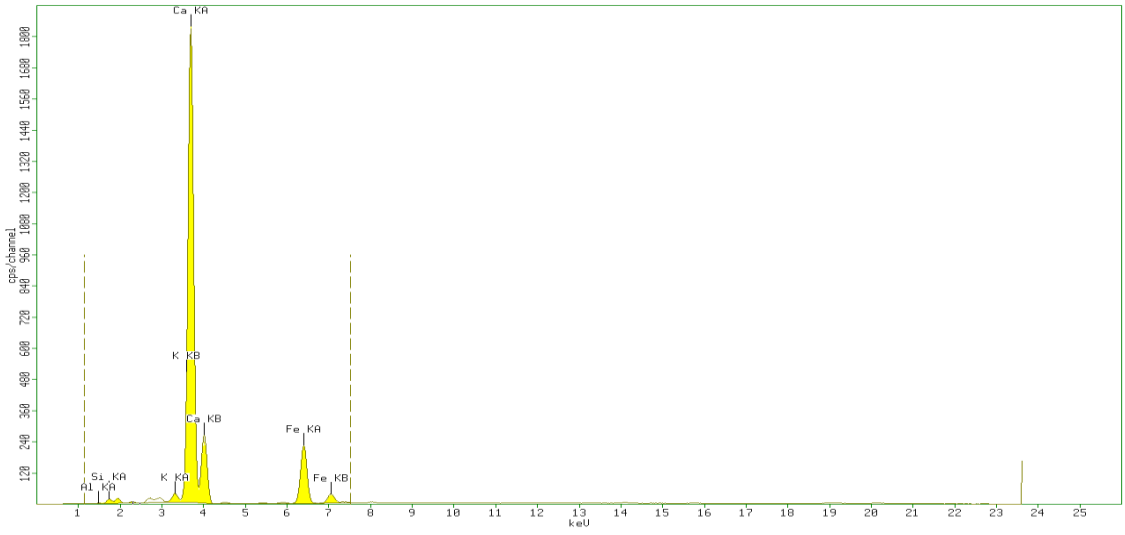



Şekil 5.3 Borjipsin XRF grafiği

Çizelge 5.2 Borjipsin XRF analizi sonuçları

| **Bileşen** | **Yüzde (%)** |
|---|---|
| $SiO_2$ | 5.3 |
| $SO_3$ | 48.7 |
| CaO | 45.1 |
| $Fe_2O_3$ | 0.985 |

Borjipse ait XRF sonuçları incelendiğinde yüksek oranda $SO_3$ ve CaO içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca yapısında düşük miktarda $SiO_2$ ve $Fe_2O_3$ içerdiği de görülmektedir.

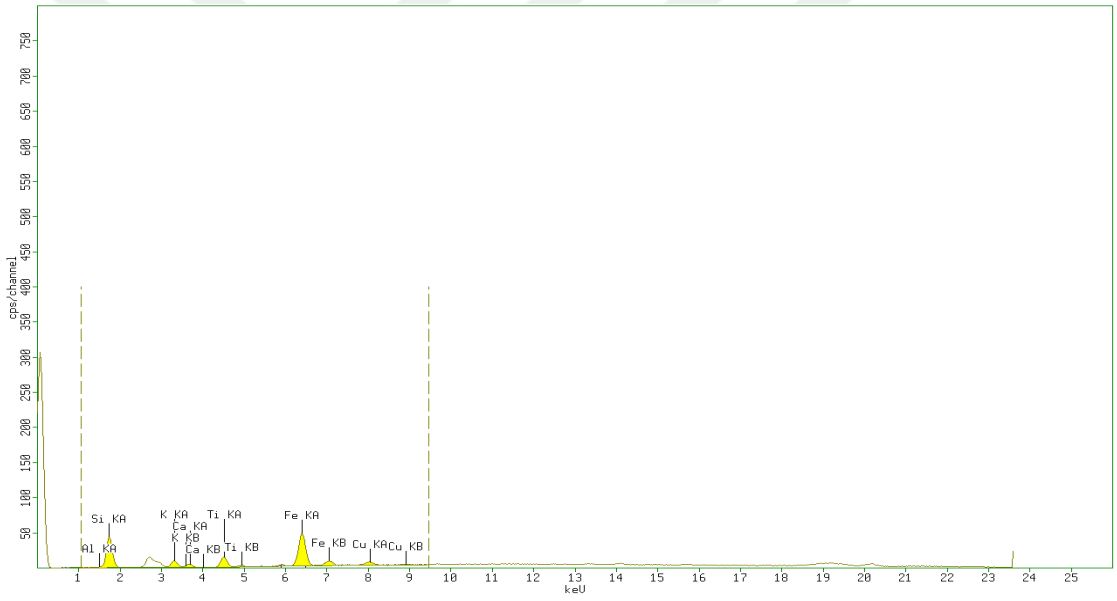



Şekil 5.4 Klinkerin XRF grafiği

Çizelge 5.3 Klinkere ait XRF analizi sonuçları

| **Bileşen** | **Yüzde (%)** |
|---|---|
| $Al_2O_3$ | 3 |
| $SiO_2$ | 14 |
| $K_2O$ | 1.27 |
| CaO | 77.57 |
| $Fe_2O_3$ | 4.73 |

Klinkere ait XRF sonuçları incelendiğinde yapısında yüksek oranda CaO ve $SiO_2$ içerdiği görülmektedir.




Şekil 5.5 Kuma ait XRF grafiği

Çizelge 5.4 Kuma ait XRF analizi sonuçları

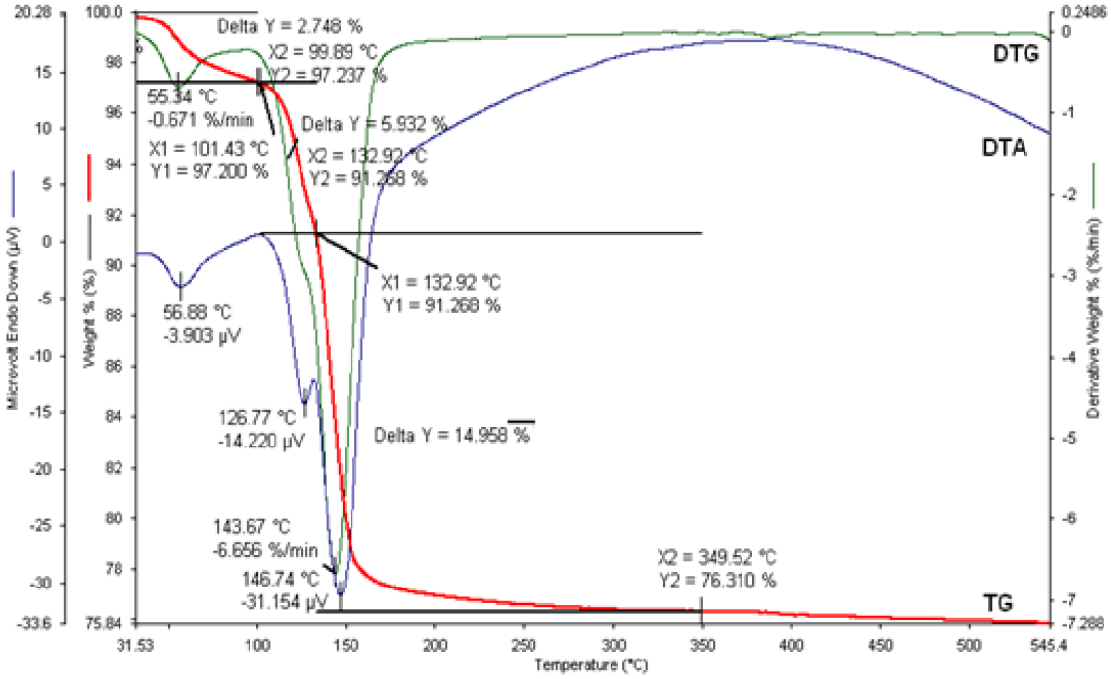
| **Bileşen** | **Yüzde (%)** |
|---|---|
| $Al_2O_3$ | 5.7 |
| $SiO_2$ | 90.8 |
| $K_2O$ | 1.3 |
| CaO | 0.41 |

Çizelge 5.4 Kuma ait XRF analizi sonuçları (devamı)

| | |
|---|---|
| $TiO_2$ | 0.87 |
| $Fe_2O_3$ | 0.859 |
| CuO | 0.053 |

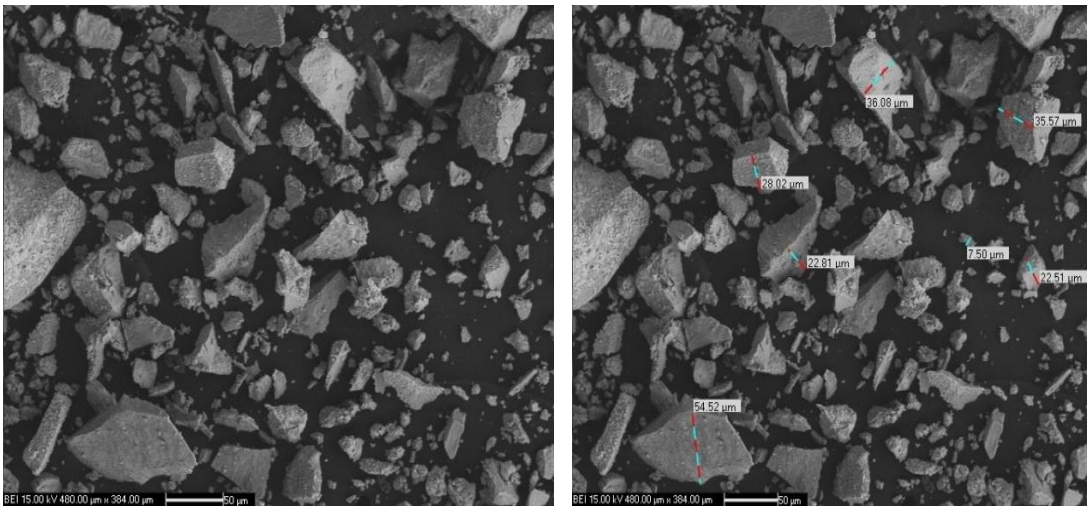
Kuma ait XRF sonuçları incelendiğinde %90.8 oranında $SiO_2$ içerdiği görülmektedir. Ayrıca yapısında düşük miktarlarda $Al_2O_3$, $K_2O$, CaO, $TiO_2$, $Fe_2O_3$ ve CuO içerdiği de görülmektedir.

Borjipse ait termal analiz sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir. TG, DTG ve DTA grafikleri incelendiğinde borjipsin 545°C'ye kadar ısıtmanın etkisi ile 3 kademeli olarak kütle kaybettiği görülmektedir. 545°C'den sonra yapıda kütle değişimi görülmemiştir. İlk adım yaklaşık 100°C civarında %2.75'lik nem kaybı görülürken, 132.9°C'de %5.93 ve 349.5°C'de ise %14.96'lık kütle kaybı meydana gelmektedir. DTA grafiğinde 56.88, 126.77 ve 143.67°C sıcaklıklarda olmak üzere 3 adet endotermik pik görülmektedir.




Şekil 5.6 Borjipse ait DTA-TG grafiği

Borjipse ait SEM görüntüleri Şekil 5.7'de verilmiştir.




Şekil 5.7 Borjipse ait SEM görüntüsü (×250 büyütme)

Borjipse ait SEM görüntüsü incelendiğinde atığın tane şeklinin düzgün dağılım göstermediği görülmektedir. Atığın tane boyutu 7.5 µm ile 54.52 µm arasında değişmektedir.

Borjipsin içerdiği B oranını belirlemek üzere ICP-OES ve mikrodalga çözümlendirme yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonucunda atığın %1.1 oranında B içerdiği belirlenmiştir.

## 5.2 Agrega Deneyleri Sonuçları

### 5.2.1 Tane Yoğunluğu Tayini Sonuçları

Le Chatelier balonu kullanılarak yapılan tane yoğunluğu deneyi sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5 Yoğunluk deneyi sonuçları

| Numune | Numune Ağırlığı (g) | $V_1$ (ml) | $V_2$ (ml) | Yoğunluk (g/ml) |
|---|---|---|---|---|
| Borjips | 45.79 | 0.8 | 19.8 | 2.41 |
| Klinker | 62.25 | 0.3 | 19.9 | 3.18 |
| Kum | 61.96 | 0.8 | 19.9 | 3.24 |

### 5.2.2 Özgül Yüzey Alanı Tayini Sonuçları

Blaine metodu kullanılarak yapılan özgül yüzey alanı tayini sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Özgül yüzey alanı tayini sonuçları

| Numune | Numune Ağırlığı (g) | Süre (sn) | Blaine ($g/cm^2$) |
|---|---|---|---|
| Borjips | 2.4148 | 32 | 3205.607 |
| Klinker | 3.1716 | 50 | 3040.563 |

### 5.2.3 Kızdırma Kaybı Tayini Sonuçları

Borjips, klinker ve kuma uygulanan kızdırma kaybı deneyi sonuçları Çizelge 5.7'de verilmiştir. Borjipsin kızdırma kaybı %14.45, klinkerin kızdırma kaybı %2.40 ve kumun kızdırma kaybı ise %2.50 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.7 Kızdırma kaybı tayini sonuçları

| Numune | Kroze (g) | Numune Tartım (g) | Numune+Kroze (g) (1000°C, 2 saat) | Kızdırma Kaybı (%) |
|---|---|---|---|---|
| Borjips | 21.4438 | 2.0082 | 23.1618 | 14.45 |
| Klinker | 20.0244 | 2.0076 | 21.9838 | 2.40 |
| Kum | 22.7878 | 2.0074 | 24.7451 | 2.50 |

### 5.2.4 Su Emme Oranı Tayini Sonuçları

Borjipsin su emme oranını belirlemek üzere yapılan deneyin sonuçları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

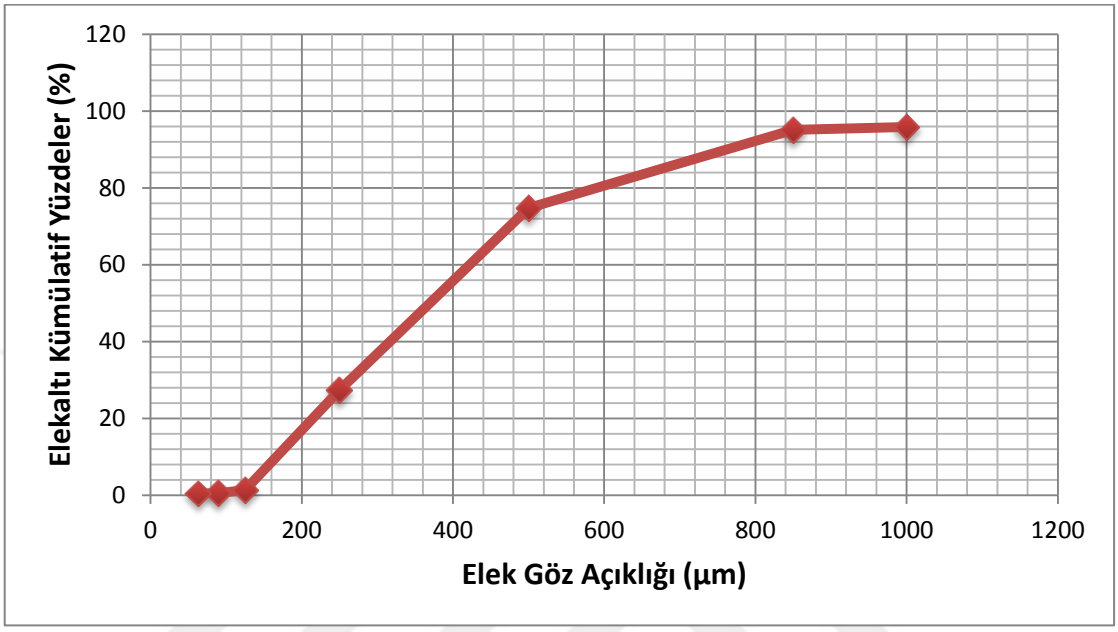
$M_1$: Etüv kurusu ağırlık = 72.76 g

$M_2$: Doygun kuru yüzey ağırlığı = 100.07 g

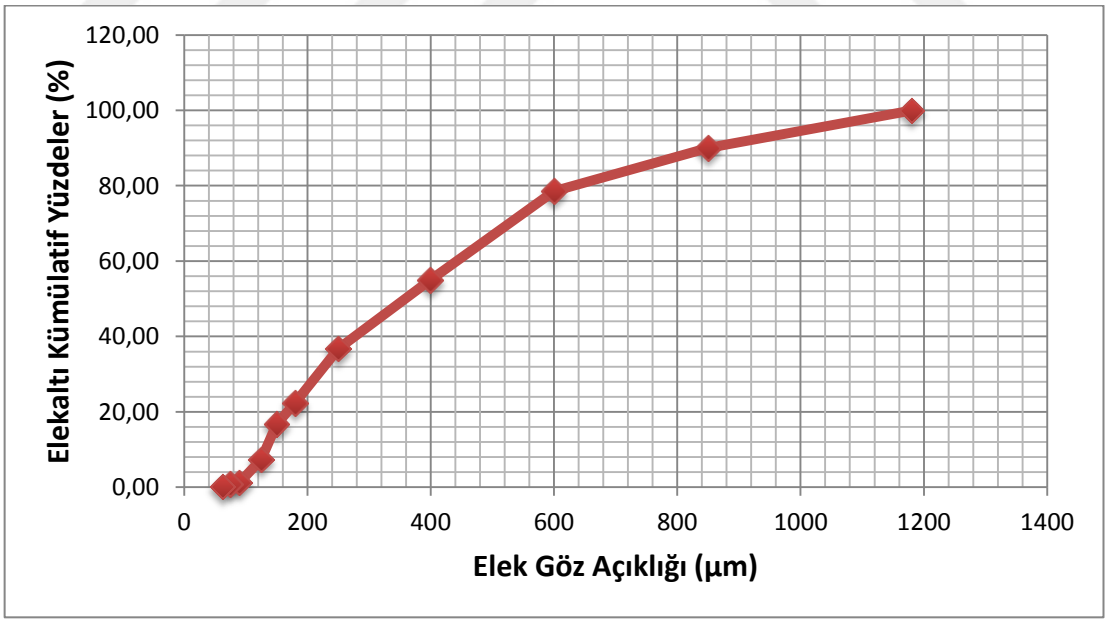
Borjipsin su emme oranı (%) = $[(M_2-M_1)/M_1]\times100$ = %37.53

### 5.2.5 Boyut Analizi Deneyi Sonuçları

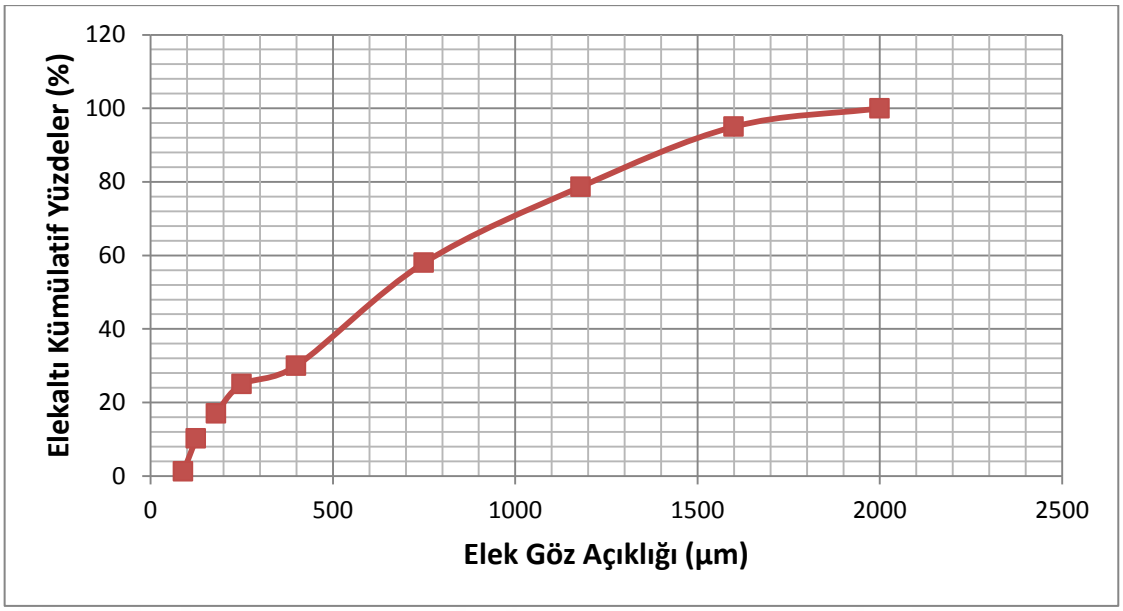
Deneylerde kullanılan borjips, klinker ve kuma ait granülometri eğrileri sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir. Standart kumun boyut dağılımının standartlara uygun olduğu görülmüştür.




Şekil 5.8 Borjipse ait granülometri eğrisi




Şekil 5.9 Klinkerin granülometri eğrisi




Şekil 5.10 Kuma ait granülometri eğrisi

### 5.2.6 Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği Analizi Sonuçları

TS EN 1744-1'e uygun olarak yapılan analize göre borjips kütlece %19.92 oranında asitte çözünebilir sülfat içermektedir. Yapılan analiz sonucunda borjipsin TS 706 EN 12620 Beton Agregaları Standardı'nda yapılan sınıflandırmaya göre $AS_{beyan}$ sınıfına girdiği belirlenmiştir.

### 5.2.7 Suda Çözünebilir Klorür İçeriği Analizi Sonuçları

TS EN 1744-1'e uygun olarak uygulanan deneye göre borjips %0.02 oranında suda çözünebilir klorür içermektedir. TS 706 EN 12620 Standardı'na göre agreganın klorür içeriği betonda toplam klor hesabında kullanılması için %0.01'i geçmemelidir. Buna göre borjips standartta belirtilen değerin dışında kalmıştır.

### 5.2.8 Toplam Kükürt İçeriği Analizi Sonuçları

Borjipse TS EN 1744-1 Standardı'na uygun olarak uygulanan toplam kükürt içeriği analizi sonucunda %7.61 kükürt içerdiği belirlenmiştir. TS 706 EN 12620 Beton Agregaları Standardı'na göre agregaların toplam kükürt içeriği havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu dışındaki agregalar için %1'i aşmamalıdır. Buna göre borjips ilgili standartta belirtilen değerden oldukça fazla miktarda kükürt içermektedir.

## 5.3 Çimento Harçlarına Uygulanan Deneylerin Sonuçları

### 5.3.1 Yayılma Tablası Deneyi Sonuçları

Çimento yayılma tablası yardımıyla taze harcın işlenebilirliğini belirlemek üzere uygulanan yayılma deneyi sonuçları katkısız karışımlar için Çizelge 5.8'de; katkılı karışımlar için Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.8 Yayılma tablası deneyi sonuçları

| Karışım | Su/binder | Borjips (%) | Yayılma Değeri (cm) |
|---|---|---|---|
| K1 | 0.50 | 0 | 10.10 |
| K2 | 0.50 | 1 | 13.00 |
| K3 | 0.50 | 3 | 13.65 |
| K4 | 0.50 | 5 | 11.65 |
| K5 | 0.50 | 7 | 12.70 |
| K6 | 0.50 | 10 | 13.50 |
| K7 | 0.45 | 0 | 10.20 |
| K8 | 0.45 | 1 | 10.40 |
| K9 | 0.45 | 3 | 11.50 |
| K10 | 0.45 | 5 | 11.45 |
| K11 | 0.45 | 7 | 11.60 |
| K12 | 0.45 | 10 | 12.00 |
| K13 | 0.40 | 0 | 10.50 |
| K14 | 0.40 | 1 | 10.30 |
| K15 | 0.40 | 3 | 10.25 |
| K16 | 0.40 | 5 | 11.00 |
| K17 | 0.40 | 7 | 11.75 |
| K18 | 0.40 | 10 | 11.50 |

Çizelge 5.8 incelendiğinde 0.50 su/binder oranı kullanılarak hazırlanan karışımlarda en yüksek yayılma değerinin %3, 0.45 su/binder oranı kullanılarak hazırlanan karışımlarda en yüksek yayılma değerinin %10, 0.40 su/binder oranı kullanılarak hazırlanan karışımlarda en yüksek yayılma değerinin %7 borjips içeren karışımda elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 5.9 Katkılı karışımlara ait yayılma tablası deneyi sonuçları

| **Karışım** | **Katkı Miktarı (%)** | **Su/binder** | **Borjips (%)** | **Yayılma Değeri (cm)** |
|---|---|---|---|---|
| K19 | 0.10 | 0.35 | 3 | 10.25 |
| K20 | 0.15 | 0.35 | 3 | 11.50 |
| K21 | 0.20 | 0.35 | 3 | 12.50 |
| K22 | 1.00 | 0.35 | 3 | 14.00 |
| K23 | 1.50 | 0.35 | 3 | 14.70 |
| K24 | 2.00 | 0.35 | 3 | 15.00 |
| K25 | 0.40 | 0.35 | 3 | 14.50 |
| K26 | 0.50 | 0.35 | 3 | 15.30 |
| K27 | 0.60 | 0.35 | 3 | 16.00 |

Çizelge 5.9 incelendiğinde hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan karışımlarda en yüksek yayılma değerinin %0.20 katkı oranında, priz hızlandırıcı katkı içeren karışımlarda en yüksek yayılma değerinin %2 katkı oranında, süper akışkanlaştırıcı içeren karışımlarda ise %0.60 katkı oranında elde edildiği görülmüştür.

Katkı içermeyen ve katkı kullanılarak hazırlanan tüm karışımların yayılma değerleri incelendiğinde yayılma değerlerinin düşük oldukları görülmektedir. Yayılma değerlerinin düşük olmasının nedeni su/binder oranlarının düşük olmasıdır.

### 5.3.2 Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Katkı içermeyen karışımların birim ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 5.10'da, katkılı karışımların birim ağırlık deneyi sonuçları ise Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.10 Katkı içermeyen karışımlara ait birim ağırlık deneyi sonuçları

| Karışım | Su/binder | Borjips (%) | Birim Ağırlık (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|
| K1 | 0.50 | 0 | 2134.75 |
| K2 | 0.50 | 1 | 2277.70 |
| K3 | 0.50 | 3 | 2315.56 |
| K4 | 0.50 | 5 | 2300.87 |
| K5 | 0.50 | 7 | 2047.14 |
| K6 | 0.50 | 10 | 2323.44 |
| K7 | 0.45 | 0 | 2000.81 |
| K8 | 0.45 | 1 | 2316.66 |
| K9 | 0.45 | 3 | 2294.63 |
| K10 | 0.45 | 5 | 2155.06 |
| K11 | 0.45 | 7 | 2238.12 |
| K12 | 0.45 | 10 | 2370.34 |
| K13 | 0.40 | 0 | 2093.70 |
| K14 | 0.40 | 1 | 2358.40 |
| K15 | 0.40 | 3 | 2224.65 |
| K16 | 0.40 | 5 | 2051.63 |
| K17 | 0.40 | 7 | 2127.17 |
| K18 | 0.40 | 10 | 2028.24 |

Çizelge 5.11 Katkılı karışımlara ait birim ağırlık deneyi sonuçları

| Karışım | Katkı Miktarı (%) | Su/binder | Borjips (%) | Birim Ağırlık (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|
| K19 | 0.10 | 0.35 | 3 | 2234.39 |
| K20 | 0.15 | 0.35 | 3 | 2149.07 |
| K21 | 0.20 | 0.35 | 3 | 2111.67 |
| K22 | 1.00 | 0.35 | 3 | 2116.19 |
| K23 | 1.50 | 0.35 | 3 | 2079.01 |
| K24 | 2.00 | 0.35 | 3 | 2215.01 |
| K25 | 0.40 | 0.35 | 3 | 2181.85 |
| K26 | 0.50 | 0.35 | 3 | 2242.98 |
| K27 | 0.60 | 0.35 | 3 | 2312.14 |

Katkı içermeyen ve katkılı karışımlara ait birim ağırlık sonuçları incelendiğinde hazırlanan tüm karışımların birim ağırlıklarının 2000-2600 kg/m$^3$ aralığında olması nedeniyle normal ağırlıklı beton sınıfına girdikleri görülmektedir.

### 5.3.3 Priz Deneyleri Sonuçları

Katkı içermeyen karışımların priz başlangıç ve bitiş süreleri Çizelge 5.12'de, katkılı karışımların priz sonuçları ise Çizelge 5.13'de verilmiştir.

Çizelge 5.12'de görüldüğü gibi karışımların içerdiği borjips oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamıştır. Su/binder oranının 0.50'den 0.45'e düşürülmesiyle karışımların priz süreleri kısalmıştır. Ancak 0.45'den 0.40'a düşürülmesiyle priz reaksiyonlarının oluşumu gecikmiş ve priz süreleri uzamıştır. K12 ve K18 karışımlarının priz başlangıç ve priz bitiş süreleri belirlenememiştir.

Çizelge 5.12 Katkı içermeyen karışımların priz sonuçları

| Karışım | Su/binder | Borjips (%) | Priz Başlangıç Süresi (dk) | Priz Bitiş Süresi (dk) |
|---|---|---|---|---|
| K1 | 0.50 | 0 | 200 | 300 |
| K2 | 0.50 | 1 | 260 | 360 |
| K3 | 0.50 | 3 | 290 | 390 |
| K4 | 0.50 | 5 | 295 | 405 |
| K5 | 0.50 | 7 | 310 | 450 |
| K6 | 0.50 | 10 | 450 | 525 |
| K7 | 0.45 | 0 | 165 | 300 |
| K8 | 0.45 | 1 | 170 | 285 |
| K9 | 0.45 | 3 | 215 | 270 |
| K10 | 0.45 | 5 | 235 | 345 |
| K11 | 0.45 | 7 | 265 | 360 |
| K12 | 0.45 | 10 | * | * |
| K13 | 0.40 | 0 | 170 | 315 |
| K14 | 0.40 | 1 | 200 | 345 |
| K15 | 0.40 | 3 | 220 | 360 |
| K16 | 0.40 | 5 | 280 | 390 |
| K17 | 0.40 | 7 | 345 | 450 |
| K18 | 0.40 | 10 | * | * |

Çizelge 5.13'de görüldüğü gibi hava sürükleyici katkı maddesi oranı arttıkça priz süreleri kısalmıştır. Priz hızlandırıcı katkı oranının arttırılmasıyla da priz süreleri kısalmıştır. Ancak hava sürükleyici katkı içeren karışımların priz süreleri, priz hızlandırıcı katkı içeren karışımlardan daha düşüktür. Bunun nedeni 0.35 su/binder oranı için hava

sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan karışımların, priz hızlandırıcı kullanılarak hazırlanan karışımlardan daha işlenebilir özellikte olmalarıdır. Süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi karışımların priz sürelerini oldukça uzatmıştır. Bu nedenle K26 ve K27 karışımlarının priz süreleri belirlenememiştir.

Çizelge 5.13 Katkılı karışımlara ait priz sonuçları

| Karışım | Katkı Miktarı (%) | Su/binder | Borjips (%) | Priz Başlangıç Süresi (dk) | Priz Bitiş Süresi (dk) |
|---|---|---|---|---|---|
| K19 | 0.10 | 0.35 | 3 | 320 | 465 |
| K20 | 0.15 | 0.35 | 3 | 275 | 420 |
| K21 | 0.20 | 0.35 | 3 | 245 | 375 |
| K22 | 1.00 | 0.35 | 3 | 370 | 465 |
| K23 | 1.50 | 0.35 | 3 | 350 | 450 |
| K24 | 2.00 | 0.35 | 3 | 320 | 435 |
| K25 | 0.40 | 0.35 | 3 | 400 | 480 |
| K26 | 0.50 | 0.35 | 3 | * | * |
| K27 | 0.60 | 0.35 | 3 | * | * |

## 5.4 Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Katkı içermeyen karışımların eğilme ve basınç dayanımı deneyi sonuçları Çizelge 5.14'de, katkılı karışımların priz sonuçları ise Çizelge 5.15'de verilmiştir.

Çizelge 5.14'de verilen 28 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değerlerinin su/binder oranının 0.50 ve 0.45 olduğu karışımlarda %3 borjips içeren, 0.40 olduğu karışımlarda ise %7 borjips içeren karışımda elde edildiği görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı değerlerinin ise su/binder oranının 0.50 olduğu karışımda %5 borjips, 0.45 ve 0.40 olduğu karışımlarda ise %3 borjips içeren karışımda elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 5.14 Katkı içermeyen karışımların eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

| Karışım | 3 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 3 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa) | 7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K1 | 15.38 | 18.18 | 30.18 | 2.71 | 2.99 | 3.84 |
| K2 | 24.35 | 29.40 | 41.98 | 3.84 | 5.01 | 6.51 |
| K3 | 23.45 | 36.27 | 45.70 | 4.59 | 6.04 | 7.02 |
| K4 | 29.66 | 35.84 | 39.74 | 5.43 | 5.90 | 7.63 |
| K5 | 23.67 | 33.13 | 45.59 | 3.93 | 4.40 | 5.71 |
| K6 | 13.69 | 16.94 | 35.22 | 2.52 | 3.37 | 5.24 |
| K7 | 8.51 | 12.08 | 16.58 | 0.00 | 0.00 | 2.99 |
| K8 | 21.89 | 32.64 | 43.55 | 3.74 | 5.05 | 6.04 |
| K9 | 27.99 | 38.88 | 49.13 | 4.63 | 6.32 | 7.16 |
| K10 | 30.96 | 37.20 | 46.51 | 4.77 | 6.37 | 6.74 |
| K11 | 28.12 | 36.81 | 48.10 | 3.74 | 5.57 | 6.37 |
| K12 | 0.00 | 17.23 | 28.88 | 0.00 | 2.99 | 4.07 |
| K13 | 11.75 | 17.32 | 27.85 | 2.15 | 2.48 | 4.87 |
| K14 | 16.57 | 22.03 | 32.83 | 3.41 | 4.16 | 5.90 |
| K15 | 17.65 | 24.66 | 34.73 | 2.85 | 4.49 | 6.18 |
| K16 | 15.90 | 26.11 | 36.64 | 2.71 | 4.21 | 6.04 |
| K17 | 14.35 | 22.33 | 38.07 | 2.06 | 3.70 | 5.29 |
| K18 | 3.53 | 17.27 | 27.51 | 0.00 | 2.29 | 3.55 |

Su/binder oranının 0.50 olduğu karışımlarda %3'lük borjips ilavesinin, hiç borjips ilave edilmemiş karışıma göre 28 günlük basınç dayanımını %51.42; su/binder oranının 0.45 olduğu karışımlarda %3'lük borjips ilavesinin, hiç borjips ilave edilmemiş karışıma göre 28 günlük basınç dayanımını %196.38; su/binder oranının 0.40 olduğu karışımlarda

%7'lik borjips ilavesinin, hiç borjips ilave edilmemiş karışıma göre 28 günlük basınç dayanımını %36.72 arttırdığı görülmektedir.

Tüm su/binder oranlarında borjips ilavesinin hiç borjips ilave edilmemiş karışımlara göre 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarını K18 numunesi haricinde arttırdığı görülmektedir.

Çizelge 5.15 Katkılı karışımlara ait eğilme ve basınç dayanımı sonuçları

| **Karışım** | **3 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)** | **7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)** | **28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)** | **3 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)** | **7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)** | **28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K19 | 21.22 | 29.07 | 34.06 | 3.46 | 4.44 | 5.94 |
| K20 | 20.85 | 29.51 | 37.37 | 3.09 | 4.30 | 5.33 |
| K21 | 23.23 | 29.16 | 38.61 | 3.32 | 4.49 | 5.99 |
| K22 | 9.15 | 12.19 | 13.42 | 0.00 | 2.01 | 2.71 |
| K23 | 11.43 | 14.09 | 21.92 | 0.00 | 2.43 | 3.27 |
| K24 | 15.73 | 22.57 | 34.46 | 2.20 | 3.04 | 3.65 |
| K25 | 46.25 | 52.66 | 65.40 | 6.59 | 7.64 | 9.08 |
| K26 | 42.37 | 50.85 | 60.52 | 6.42 | 7.37 | 8.63 |
| K27 | 39.87 | 46.74 | 59.03 | 6.35 | 7.11 | 8.19 |

Çizelge 5.15'de verilen 28 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde katkı içeren karışımlarda en yüksek basınç ve eğilme dayanımlarının %0.20 hava sürükleyici katkı, %2 priz hızlandırıcı ve %0.40 süper akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Hava sürükleyici ve priz hızlandırıcı katkı maddesi oranı arttıkça dayanım sonuçlarının arttığı, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı arttıkça dayanım sonuçlarının azaldığı görülmektedir.

Katkı içermeyen ve katkılı tüm karışımlar arasında en yüksek eğilme ve basınç dayanımı %0.40 süper akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımdan elde edilmiştir. Bu karışımın 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 9.08 MPa ve 65.40 MPa'dır.

## 5.5 Su Emme Deneyi Sonuçları

Su emme deneyi sonuçları Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16 Katkısız karışımlara ait su emme deneyi sonuçları

| Karışım | Su/binder | Borjips (%) | Su Emme Oranı (%) |
|---|---|---|---|
| K1 | 0.50 | 0 | 1.15 |
| K2 | 0.50 | 1 | 0.70 |
| K3 | 0.50 | 3 | 0.80 |
| K4 | 0.50 | 5 | 1.43 |
| K5 | 0.50 | 7 | 1.36 |
| K6 | 0.50 | 10 | 1.24 |
| K7 | 0.45 | 0 | 1.04 |
| K8 | 0.45 | 1 | 0.98 |
| K9 | 0.45 | 3 | 0.86 |
| K10 | 0.45 | 5 | 1.24 |
| K11 | 0.45 | 7 | 1.12 |
| K12 | 0.45 | 10 | 1.29 |
| K13 | 0.40 | 0 | 1.17 |
| K14 | 0.40 | 1 | 1.54 |
| K15 | 0.40 | 3 | 1.33 |
| K16 | 0.40 | 5 | 1.19 |
| K17 | 0.40 | 7 | 0.83 |
| K18 | 0.40 | 10 | 1.32 |

Çizelge 5.16 incelendiğinde katkı içermeyen karışımların su emme oranlarının %0.70 ve %1.54 arasında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 5.17 Katkılı karışımlara ait su emme deneyi sonuçları

| Karışım | Katkı Miktarı (%) | Su/binder | Borjips (%) | Su Emme Oranı (%) |
|---|---|---|---|---|
| K19 | 0.10 | 0.35 | 3 | 1.02 |
| K20 | 0.15 | 0.35 | 3 | 0.85 |
| K21 | 0.20 | 0.35 | 3 | 0.92 |
| K22 | 1.00 | 0.35 | 3 | 5.77 |
| K23 | 1.50 | 0.35 | 3 | 3.81 |
| K24 | 2.00 | 0.35 | 3 | 2.07 |
| K25 | 0.40 | 0.35 | 3 | 0.58 |
| K26 | 0.50 | 0.35 | 3 | 0.62 |
| K27 | 0.60 | 0.35 | 3 | 1.03 |

Çizelge 5.17 incelendiğinde karışımların içerdiği hava sürükleyici ve priz hızlandırıcı katkı miktarı arttıkça su emme oranlarının azaldığı görülmektedir. Süper akışkanlaştırıcı katkı oranı arttıkça karışımların su emme oranları artmıştır.

## 5.6 $MgSO_4$ Durabilite Deneyleri Sonuçları

Durabilite deney sonuçları Çizelge 5.18'de verilmiştir. K9-1-1 15 gün, K9-1-2 30 gün, K9-1-3 45 gün boyunca 0.50 M $MgSO_4$ çözeltisinde kürlenmiş numunelerdir. K9-2-1 15 gün, K9-2-2 30 gün ve K9-2-3 45 gün boyunca suda kürlenmiş numunelerdir.

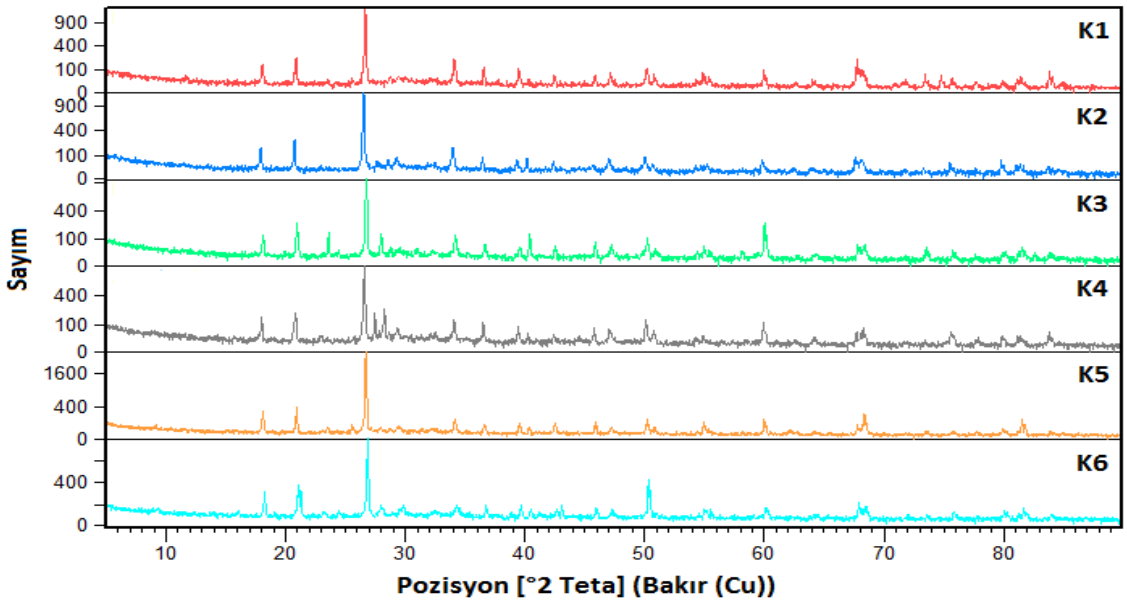
Çizelge 5.18'de verilen kütle değişimi değerleri incelendiğinde $MgSO_4$ çözeltisinde kürlenen numunelerde önemli miktarda kütle değişimi görülmemiştir. Suda kürlenen numunelerde ise oldukça küçük miktarda kütle artışı görülmüştür. $MgSO_4$ çözeltisinde ve suda kürlenen numunelerin basınç dayanımları sonuçları karşılaştırıldığında birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Elde edilen sonuçlardan borjips içeren numunelerin $MgSO_4$ durabilitesinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.18 $MgSO_4$ durabilitesi deney sonuçları

| Numune | Eğilme Dayanımı (MPa) | Basınç Dayanımı (MPa) | Kütle Değişimi (%) |
|---|---|---|---|
| K9-1-1 | 7.25 | 41.16 | -0.42 |
| K9-1-2 | 8.33 | 45.47 | -0.32 |
| K9-1-3 | 7.96 | 47.56 | -0.28 |
| K9-2-1 | 6.13 | 42.63 | 0.07 |
| K9-2-2 | 7.77 | 45.11 | 0.03 |
| K9-2-3 | 6.93 | 44.97 | 0.33 |

## 5.7 XRD Analizi Sonuçları

Su/binder oranı 0.50 olan karışımlara ait XRD paternleri Şekil 5.11'de, 0.45 olan karışımların XRD paternleri Şekil 5.12'de, 0.40 olan karışımların XRD paternleri ise Şekil 5.13'de verilmiştir. XRD sonuçları ise sırasıyla Çizelge 5.19, Çizelge 5.20 ve Çizelge 5.21'de verilmiştir.

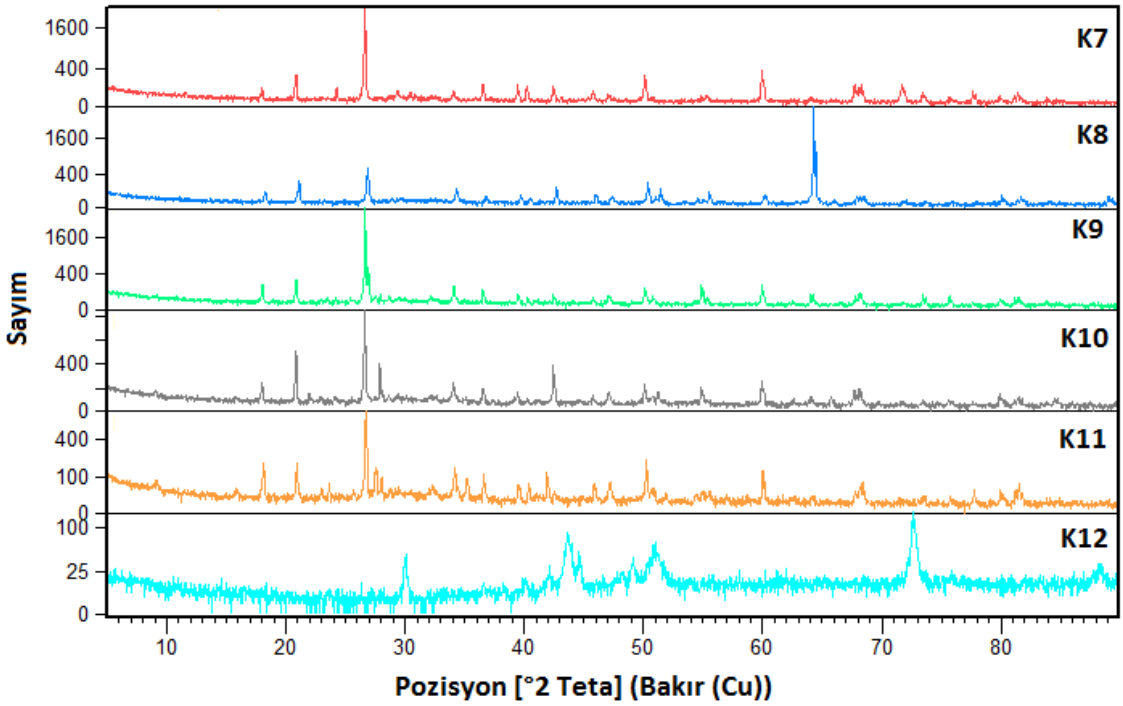



Şekil 5.11 Su/binder oranı 0.50 olan karışımlara ait XRD paternleri

Çizelge 5.19 Su/binder oranı 0.50 olan karışımların XRD sonuçları

| Numune | Pdf Kodu | Mineral İsmi | Mineral Formülü | XRD Skoru |
|---|---|---|---|---|
| K1 | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 70 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 41 |
| K2 | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 77 |
| | 00-033-0306 | Kalsiyum Silikat Hidrat | $Ca_{1.5}SiO_{3.5}{\cdot}H_2O$ | 21 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 27 |
| K3 | 00-033-1161 | Silika | $SiO_2$ | 72 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 50 |
| | 00-026-0328 | Kalsiyum Sülfat | $CaSO_4$ | 19 |
| K4 | 00-033-1161 | Silika | $SiO_2$ | 74 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 45 |
| | 00-029-0329 | Tobermorit | $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2$ | 18 |
| | 00-045-0156 | Kalsiyum Silikat | $CaSiO_3$ | 10 |
| K5 | 00-033-1161 | Silika | $SiO_2$ | 70 |
| | 00-004-0733 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 29 |
| | 00-033-0306 | Kalsiyum Silikat Hidrat | $Ca_{1.5}SiO_{3.5}{\cdot}H_2O$ | 20 |
| K6 | 00-033-1161 | Silika | $SiO_2$ | 66 |
| | 00-004-0733 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 14 |
| | 00-029-0329 | Tobermorit | $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2$ | 10 |

Su/binder oranı 0.50 olan karışımların 28 günlük XRD sonuçlarının verildiği Çizelge 5.19 incelendiğinde tüm karışımlarda silika ve portlantit yapılarının oluştuğu görülmektedir.




Şekil 5.12 Su/binder oranı 0.45 olan karışımlara ait XRD paternleri

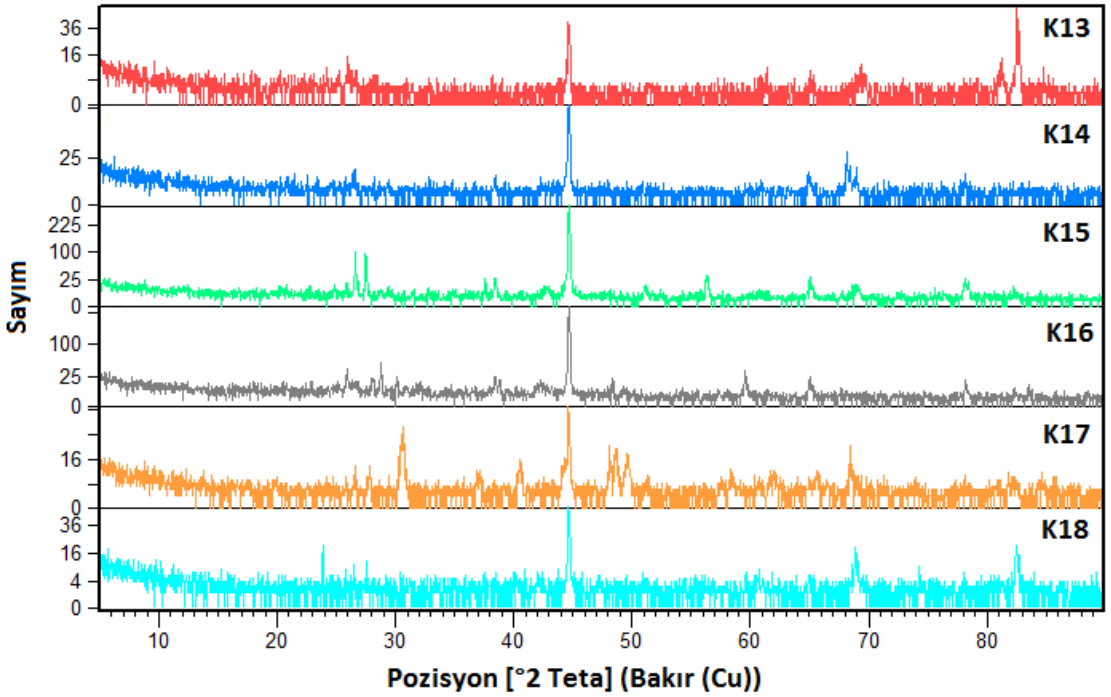
Çizelge 5.20 Su/binder oranı 0.45 olan karışımların XRD sonuçları

| Numune | Pdf Kodu | Mineral İsmi | Mineral Formülü | XRD Skoru |
|---|---|---|---|---|
| K7 | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 67 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 35 |
| | 00-033-0306 | Kalsiyum Silikat Hidrat | $Ca_{1.5}SiO_{3.5}·H_2O$ | 23 |
| K8 | 00-033-1161 | Silika | $SiO_2$ | 69 |
| | 00-004-0733 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 19 |
| K9 | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 57 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 46 |
| | 00-029-0329 | Tobermorit | $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2$ | 3 |
| K10 | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 63 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 26 |
| | 00-020-0452 | Gismondin | $CaAl_2Si_2O_8·4H_2O$ | 30 |

Çizelge 5.20 Su/binder oranı 0.45 olan karışımların XRD sonuçları (devamı)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| K11 | 00-046-1045 | Kuartz, syn | $SiO_2$ | 64 |
| | 00-044-1481 | Portlantit,syn | $Ca(OH)_2$ | 44 |
| | 00-041-1451 | Etrenjit | $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}{\cdot}26H_2O$ | 12 |
| K12 | 00-012-0739 | Kalsiyum Hidrojen Silikat | $CaH_4Si_2O_7$ | 27 |

Su/binder oranı 0.45 olan karışımların 28 günlük XRD sonuçlarının verildiği Çizelge 5.20 incelendiğinde tüm karışımlarda silika ve portlantit yapılarının oluştuğu görülmektedir.




Şekil 5.13 Su/binder oranı 0.40 olan karışımlara ait XRD paternleri

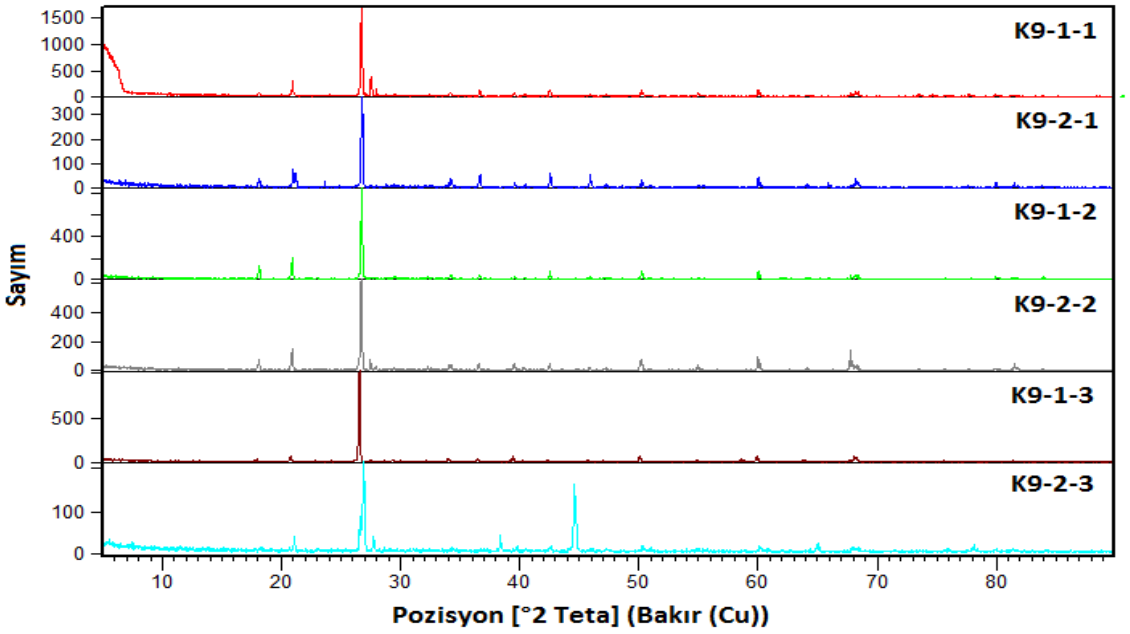
Çizelge 5.21 Su/binder oranı 0.40 olan karışımların XRD sonuçları

| **Numune** | **Pdf Kodu** | **Mineral İsmi** | **Mineral Formülü** | **XRD Skoru** |
|---|---|---|---|---|
| K13 | - | Amorf | - | - |
| K14 | - | Amorf | - | - |
| K15 | 00-035-0469 | Goosecreekit | $CaAl_2Si_6O_{16}{\cdot}5H_2O$ | 2 |
| | 00-030-0226 | Brownmillerit,syn | $Ca_2(Al, Fe^{+3})_2O_5$ | 2 |

Çizelge 5.21 Su/binder oranı 0.40 olan karışımların XRD sonuçları (devamı)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| K16 | 00-033-1161 | Silika | $SiO_2$ | 5 |
| | 00-043-1488 | Kalsiyum Silikat Hidroksit Hidrat | $Ca_{4.5}Si_6O_{15}(OH)_3{\cdot}2H_2O$ | 2 |
| K17 | 00-034-0517 | Dolomit, Ferroan | $Ca(Mg, Fe)(CO3)_2$ | 31 |
| | 00-029-0381 | Kalsiyum Silikat Hidroksit | $Ca_4Si_5O_{13.5}(OH)_2$ | 2 |
| K18 | - | Amorf | - | - |

$MgSO_4$ durabilitesi deneyleri için hazırlanmış numunelerin XRD paternleri Şekil 5.14'de verilmiştir. XRD sonuçları ise Çizelge 5.22'de verilmiştir.




Şekil 5.14 $MgSO_4$ durabilitesi deney numuneleri XRD paternleri

Çizelge 5.22 $MgSO_4$ durabilitesi deney numuneleri XRD sonuçları

| Numune | Pdf Kodu | Mineral İsmi | Mineral Formülü | XRD Skoru |
|---|---|---|---|---|
| K9-1-1 | 01-086-1628 | Kuartz | $SiO_2$ | 69 |
| | 01-084-1264 | Kalsiyum Hidroksit | $Ca(OH)_2$ | 31 |
| K9-1-2 | 01-086-1628 | Kuartz | $SiO_2$ | 69 |
| | 01-072-0156 | Portlantit, syn | $Ca(OH)_2$ | 26 |

Çizelge 5.22 $MgSO_4$ durabilitesi deney numuneleri XRD sonuçları (devamı)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| K9-1-3 | 01-089-8935 | Kuartz | $SiO_2$ | 61 |
| | 01-084-1272 | Kalsiyum Hidroksit | $Ca(OH)_2$ | 20 |
| K9-2-1 | 01-086-1628 | Kuartz | $SiO_2$ | 52 |
| | 01-072-0156 | Portlantit, syn | $Ca(OH)_2$ | 27 |
| K9-2-2 | 01-085-0794 | Kuartz | $SiO_2$ | 68 |
| | 00-004-0733 | Portlantit, syn | $Ca(OH)_2$ | 17 |
| K9-2-3 | 01-078-1257 | Kuartz | $SiO_2$ | 17 |
| | 00-045-1204 | Alüminyum Demir Silisyum | $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$ | 28 |

# BÖLÜM 6

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan yüksek lisans tez çalışmasında borik asit üretimi sırasında açığa çıkan borjips atığının çimento üretiminde değerlendirilmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Klinker, borjips, standart kum, su ve çeşitli kimyasal katkılar kullanılarak Türk standartlarına uygun şekilde harçlar hazırlanmıştır.

Borjips ilavesinin hazırlanan harçların özelliklerine etkisini belirleyebilmek amacıyla %0, 1, 3, 5, 7 ve 10 borjips içeren karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca karışımın içerdiği su miktarının harçların özelliklerine olan etkisinin incelenmesi amacıyla farklı su/binder oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlara yayılma tablası, birim ağırlık ve priz deneyleri uygulanmıştır. 3, 7 ve 28 gün boyunca suda kürlenen numunelere eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Katkı kullanılmadan gerçekleştirilen deneyler sonucunda en yüksek dayanımın elde edildiği borjips oranı belirlenerek farklı oranlarda hava sürükleyici, priz hızlandırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkılar içeren karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca en yüksek dayanım sonuçlarının elde edildiği karışıma $MgSO_4$ durabilitesi deneyi de uygulanmıştır.

Katkı içermeyen ve katkı kullanılarak hazırlanan harçların yayılma değerlerinin düşük oldukları görülmüştür. Yayılma değerlerinin düşük olması su/binder oranlarından kaynaklanmaktadır.

Hazırlanan harçların birim ağırlık deneyi sonuçlarına göre tamamının birim ağırlıklarının 2000-2600 $kg/m^3$ aralığında olması nedeniyle normal ağırlıklı beton sınıfına girdikleri görülmüştür.

Karışımların içerdiği borjips oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamıştır. Su/binder oranının 0.50'den 0.45'e düşürülmesiyle karışımların priz süreleri kısalmıştır. Ancak 0.45'den 0.40'a düşürülmesiyle priz reaksiyonlarının oluşumunun gecikmesi nedeniyle priz süreleri uzamıştır. Hava sürükleyici ve priz hızlandırıcı katkı maddelerinin oranı arttıkça priz süreleri kısalmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi karışımların priz sürelerini oldukça uzatmıştır.

Su/binder oranının 0.50 seçildiği karışımlardan sonra dayanımın arttırılması amacıyla su/binder oranı 0.45'e düşürülmüştür ve eğilme ve basınç dayanımlarında artış görülmüştür. Su/binder oranının 0.40'a düşürülmesiyle karışımların işlenebilirliği önemli ölçüde azalmıştır ve bu nedenle dayanımlarında da düşüş görülmüştür. En yüksek eğilme ve basınç dayanımı sonuçları su/binder oranının 0.50 ve 0.45 olduğu karışımlarda %3 borjips içeren karışımlardan elde edilmiştir. Su/binder oranının 0.50 olduğu ve %3 borjips içeren karışım için eğilme ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 7.02 MPa ve 45.70 MPa olarak, su/binder oranının 0.45 olduğu ve %3 borjips içeren karışım için eğilme ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 7.16 MPa ve 49.13 MPa olarak elde edilmiştir. Bu nedenle daha sonra hazırlanan katkılı karışımlarda ve $MgSO_4$ durabilitesi deneylerinde borjips oranı %3 olarak seçilmiştir.

$MgSO_4$ durabilitesini belirlemek amacıyla 15, 30 ve 45 gün boyunca suda ve $MgSO_4$ çözeltisinde kürlenen numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim belirlenmiş ve eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Belirlenen süreler sonrasında $MgSO_4$ çözeltisinde kürlenen numunelerde önemli miktarda kütle değişimi görülmemiştir. $MgSO_4$ çözeltisinde ve suda kürlenen numunelerin basınç dayanımları sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan borjips içeren numunelerin $MgSO_4$ durabilitesinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Su/binder oranının 0.50 olduğu karışımlarda %3'lük borjips ilavesinin, hiç borjips ilave edilmemiş karışıma göre 28 günlük basınç dayanımını %51.42; su/binder oranının 0.45 olduğu karışımlarda %3'lük borjips ilavesinin, hiç borjips ilave edilmemiş karışıma göre 28 günlük basınç dayanımını %196.38; su/binder oranının 0.40 olduğu karışımlarda

%7'lik borjips ilavesinin, hiç borjips ilave edilmemiş karışıma göre 28 günlük basınç dayanımını %36.72 arttırdığı görülmüştür.

Hava sürükleyici ve priz hızlandırıcı katkı maddesi oranı arttıkça dayanım sonuçlarının arttığı, süper akışkanlaştırıcı katkı oranı arttıkça dayanım sonuçlarının azaldığı görülmektedir.

Yapılan yüksek lisans tezi kapsamında hazırlanan tüm karışımlar arasında en yüksek eğilme ve basınç dayanımı 0.35 su/binder oranı için %3 borjips ve %0.40 süper akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımdan elde edilmiştir. Bu karışımın 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 9.08 MPa ve 65.40 MPa'dır. Daha sonraki çalışmalarda bu oranlardan yararlanılarak ve farklı kimyasal ve mineral katkı maddeleri kullanılarak yeni çalışmalar yürütülebilir.

## KAYNAKLAR


[1] Mutuk, T. ve Mesci, B., (2014). “Analysis of Mechanical Properties of Cement Containing Boron Waste and Rice Husk Ash Using Full Factorial Design”, Journal of Cleaner Production, 69(2014): 128-132.

[2] Sevim, U. K., (2011). "Colemanite Ore Waste Concrete with Low Shrinkage and High Split Tensile Strength", Materials and Structures, 44: 187-193.

[3] Kavas, T., Olgun, A. ve Erdoğan, Y., (2005). “Setting and Hardening of Borogypsum-Portland Cement Clinker-Fly Ash Blends. Studies on Effects of Molasses on Properties of Mortar Containing Borogypsum”, Cement and Concrete Research, 35(2005): 711-718.

[4] Erdoğan, Y., Yaşar, E. ve Gamage Ranjith, P., (2016). "Obtaining Lightweight Concrete Using Colemanite Waste and Acidic Pumice", Physicochemical Problems of Mineral Processing, 52(1): 35-43.

[5] Erdoğmuş, E., (2013). "Combined Effect of Waste Colemanite and Silica Fume on Properties of Cement Mortar", Science and Engineering of Composite Materials, 21: 369-375.

[6] Erdoğmuş, E., Erdoğan, Y., Gencel, O., Targan, Ş. ve Avcıata, U., (2012). "Influence of Colemanite Admixture on Portland Cement Durability", Advances in Cement Research, 24(3): 155-164.

[7] Gencel, O., Brostow, W., Özel, C. ve Filiz, M., (2010). "An Investigation on the Concrete Properties Containing Colemanite", International Journal of Physical Sciences, 5(3): 216-225.

[8] Alp, İ., Deveci, H., Süngün, Y. H., Yazıcı, E. Y., Savaş, M. ve Demirci, S., (2009). "Leachable Characteristics of Arsenical Borogypsum Wastes and Their Potential Use in Cement Production", Environmental Science & Technology, 43: 6939-6943.

[9] Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Sevinç, V., (2003). "Influence of Natural Puzzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash, and Fly Ash on the Properties of Portland Cement", Cement and Concrete Research, 33: 1175-1182.

[10] Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Sevinç, V., (2002). "Effects of Supplementary Cementing Materials on the Properties of Cement and Concrete", Cement and Concrete Research, 32: 1551-1558.

[11] Erdoğan, Y., Zeybek, M. S. ve Demirbaş, A., (1998). "Cement Mixes Containing Colemanite from Concentrator Wastes", Cement and Concrete Research, 28(4): 605-609.

[12] Sevim, U. K. ve Tümen, Y., (2013). "Strength and Fresh Properties of Borogypsum Concrete", Construction and Building Materials, 48: 342-347.

[13] Korçak, Ö., (2014). Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Kullanılması ve Çimentonun Performans Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[14] Öntürk, S., (2011). Borojipsin Betonda Kullanılabilirliğinin Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler ile Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

[15] Tümen, Y., (2008). Borojipsin Betonun Bazı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

[16] Aydın, U., (2009). Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

[17] Yaltay, N., (2015). Kolemanit Katkılı Çimento ile Üretilen Pomza Agregalı Hafif Betonun Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[18] Özmal, F., (2005). Bor Endüstri Atıkları, Uçucu Kül, Taban Külü ve Alünit Mineralinin Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

[19] Eyyüboğlu, S., (2013). Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

[20] Altınköprü, N., (2010). Bor Endüstri Atıkları ve Prina Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

[21] Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Bor Elementi, http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi, 6 Ocak 2016.

[22] Moral, Ç., (2010). Kolemanitten Kalsiyum Fosfat Çimentosu Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[23] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bor Mineralleri, http://www.etimaden.gov.tr/tr/page/uretim-bor-mineralleri, 6 Ocak 2016.

[24] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, (2015). Bor Sektör Raporu, Ankara.

[25] Yıldırım, M., (2013). Sodyum Boratlardan Magnezyum Borat Üretiminin Araştırılması ve Üretim Parametrelerini Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[26] Mineralogy Database, http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=1580#.Vo0tv_mLTIU, 6 Ocak 2016.

[27] Yenialaca, Ç., (2009). Bor ve Kullanım Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[28] Mineralogy Database, http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=271&target=Colemanite#.Vo0wYPmLTIU, 6 Ocak 2016.

[29] Handırı, İ., (2010). Kolemanitten Amonyum Tuzları, İnorganik ve Organik Asitler Kullanılarak Borik Asit Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

[30] Mineralogy Database, http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=1176&target=Ulexite#.Vo1BwvmLTIU, 6 Ocak 2016.

[31] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bor Kullanım Alanları, http://www.etimaden.gov.tr/tr/page/cam, 6 Ocak 2016.

[32] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bor Kullanım Alanları, http://www.etimaden.gov.tr/tr/page/tarim, 6 Ocak 2016.

[33] Altınköprü, N., (2010). Bor Endüstri Atıkları ve Prina Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

[34] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bor Kullanım Alanları, http://www.etimaden.gov.tr/tr/page/yalitim, 6 Ocak 2016.

[35] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bor Kullanım Alanları, http://www.etimaden.gov.tr/tr/page/enerji, 6 Ocak 2016.

[36] Uğurlu, A., (2009). Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin Çimento İçerisinde Puzolanik Malzemeler ile Birlikte Kullanılmasının Çimento Üzerindeki Etkileri, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

[37] Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Bor Kullanım Alanları, http://www.boren.gov.tr/tr/bor/kullanim-alanlari/cimento, 6 Ocak 2016.

[38] Yorulmaz, A., (2014). Tinkal Cevherinden Nitrik Asit Kullanılarak Borik Asit Üretim Prosesinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[39] Ertınmaz, B., (2015). Bor Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

[40] Erkmen, J., (2013). Boraksın Bipolar Membranlı Bir Hücrede Elektrodiyalizi ile Borik Asit ve Sodyum Hidroksit Üretimi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

[41] Karagöz, Ö., Çopur, M. ve Kocakerim, M., (2012). "Tinkalden Borik Asit Üretiminin Optimizasyonu", Onuncu Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 3-6 Eylül 2012, İstanbul.

[42] Karakaş, İ. H., (2012). Kükürt Dioksitin Sulu Çözeltileriyle Üleksitten Borik Asit ve Sodyum Sülfit Üretiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

[43] Yakar Elbeyli, İ. ve Pişkin, S., (2004). "Structural Properties of Different Sizes of Borogypsum", Altıncı Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 7-10 Eylül 2004, İzmir.

[44] Özer, Ş., (2012). Farklı Çimentoların Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[45] Mohammadıahmadabad, Y., (2014). Öğütülmüş Atık Petlerle Üretilen Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

[46] Yalçın, H. ve Gürü, M., (2006). Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık, 414, Ankara.

[47] Kandemir, H., (2014). Farklı Mineral Bağlayıcı Bileşenlerin Betonun Kalıcılığına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[48] Aslan, M. G., (2015). Mikronize Filtre Perlitin Betonda Mineral Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Avrasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[49] Rende, K., (2013). Türkiye Çimento Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

[50] Eyyüboğlu, S., (2013). Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

[51] Fayetorbay, İ., (2013). Borlu Aktif Belit Çimentolu Isıl İşlem Görmüş ve Görmemiş Betonların Hidratasyon Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

[52] Akçansa, (2012). Teknik Notlar-3, İstanbul.

[53] Fındık, A., (2007). Kolemanit Konsantratör Atığının Beton ve Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

[54] Oyak Beton, Taze Beton Özellikleri, http://www.oyakbeton.com.tr/tr/urunler/hazir-beton-uzerine, 17 Ocak 2016.

[55] TS EN 197-1, (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.

[56] Akçansa, (2012). TS EN 197-1 Standardı'ndaki Değişiklikler, Hazır Beton Mart Nisan, İstanbul.

[57] Akçansa, (2012). Teknik Notlar-1, İstanbul.

[58] Yalçın Erzengin, S. G., (2010). Kimyasal Katkıların Çimento Bazlı Malzemelerin Dayanımına, Reolojisine ve Mikro Yapısına Etkileri, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[59] Akyüz, K., (2015). Kimyasal Katkıların Harç Fazına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

[60] Katkı Üreticileri Birliği, Katkı Sınıfları, http://www.kub.org.tr/katkisiniflari.html, 20 Ocak 2016.

[61] TS 500, (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.

[62] Örtlek, E., (2015). Mısır,Buğday ve Ayçiçeği Sapı Külü ile Barit ve Kolemanit Katkılı Betonların Mühendislik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

[63] TS EN 206-1, (2002). Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, TSE, Ankara.

[64] TS EN 196-6, (2010). Çimento Deney Yöntemleri-Bölüm 6: İncelik Tayini, TSE, Ankara.

[65] TS EN 1744-1, (2013). Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Kimyasal Analiz, TSE, Ankara.

[66] TS 706 EN 12620, (2009). Beton Agregaları Standardı, TSE, Ankara.

[67] TS EN 196-1, (2009). Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, TSE, Ankara.

[68] TS EN 1015-3, (2000). Kagir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle), TSE, Ankara.

[69] TS EN 480-2, (2006). Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin-Deney Metotları-Bölüm 2: Priz Süresinin Tayini, TSE, Ankara.

# ÖZGEÇMİŞ

**KİŞİSEL BİLGİLER**


**Adı Soyadı** : Kübra KUNT

**Doğum Tarihi ve Yeri** : 10 Haziran 1991, İstanbul

**Yabancı Dili** : İngilizce

**E-posta** : kuntkubra@gmail.com


**ÖĞRENİM DURUMU**

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|---|---|---|---|
| Lisans | Kimya Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2013 |
| Lisans | İşletme | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2015 |
| Lise | Fen Bilimleri | Prof. Faik Somer Anadolu Lisesi | 2009 |

**YAYINLARI**

**Makale (SCI Kapsamı Dışında)**

1. Kunt, K., Dur, F., Ertınmaz, B., Yıldırım, M., Möröydor Derun, E. ve Pişkin, S., (2015). "Utilization of Boron Waste as an Additive for Cement Production", International Turkic World Conference on Chemical Sciences and Technologies, 27-31 Ekim 2015, Saraybosna.

2. Kunt, K., Yıldırım, M., Dur, F., Möröydor Derun, E. ve Pişkin, S., (2015). "Utilization of Bergama Gold Tailings as an Additive in the Mortar", International Turkic World Conference on Chemical Sciences and Technologies, 27-31 Ekim 2015, Saraybosna.

3. Kıpçak, A. S., Gürses, P., Kunt, K., Möröydor Derun, E. ve Pişkin, S., (2013). "Magnesium Borate Synthesis by Microwave Method Using $MgCl_2.6H_2O$ and $H_3BO_3$", World Academy of Science, Engineering and Technology, Mayıs 2013, Berlin.

**Bildiri**

1. Kunt, K., Kıpçak A. S., Möröydor Derun, E. ve Pişkin, S., (2013). "Düşük Sıcaklıkta (60°C) Magnezyum Klorürden Hidrotermal Yöntemle Magnezyum Borat Sentezi", 2. Ulusal Kimya Mühendisliği Öğrenci Kongresi, 4-6 Mayıs 2013, Ankara.