



# **ERKEN DAYANIMI YÜKSEK AKICI BETONLARDA MİKRONİZE KALSİT ETKİSİ**

**Nur ÜNAL**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Şenol GÜRSOY**

**ERKEN DAYANIMI YÜKSEK AKICI BETONLARDA MİKRONİZE  
KALSİT ETKİSİ**

**Nur ÜNAL**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Şenol GÜRSOY**

**KARABÜK  
Ocak 2022**

Nur ÜNAL tarafından hazırlanan “ERKEN DAYANIMI YÜKSEK AKICI BETONLARDA MİKRONİZE KALSİT ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Şenol GÜRSOY

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 14 / 01 / 2022

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Şenol GÜRSOY (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Özlem SALLI BİDECİ (Düzce Ü.)

.....

Üye : Doç. Dr. İlker TEKİN (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tez çalışmasındaki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiğı şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Nur ÜNAL

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ERKEN DAYANIMI YÜKSEK AKICI BETONLARDA MİKRONİZE KALSİT ETKİSİ**

**Nur ÜNAL**

**Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:  
Prof. Dr. Şenol GÜRSOY  
Ocak 2022, 85 sayfa**

Bugün dünyada en çok tercih edilen yapı malzemesi betondur. Son yıllarda yapılan çalışmalar daha uzun ömürlü, erken dayanımı yüksek ve daha iyi mekanik özelliklere sahip özel beton türlerini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca bu çalışmalarla yüksek dayanım, ultra yüksek dayanım ve reaktif pudra betonu gibi özel terimler kullanılmaya başlanmıştır. Ortaya çıkan bu özel beton türleri teknolojinin gelişmesiyle birlikte bugün; yüksek katlı yapılaşmalarda, barajlar, barajların onarımı ve boşaltma kanalları, açık deniz platformları, endüstriyel döşemeler, aşınmaya dayanıklı yol betonları, su yapıları ve çok uzun ömürlü olması planlanan (100 yıl) büyük projelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında erken dayanımı yüksek akıcı betonlarda mikronize kalsit etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla bağlayıcı malzeme olarak silis dumanı, mikrokalsit, uçucu kül gibi endüstriyel atık malzemeler ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak

Üretilen betonların özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda akıcı betonun avantajları, kullanım alanları, taze ve sertleşmiş beton özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda erken dayanımı yüksek beton numuneler elde edilmiş ve bunların özellikle prefabrik yapılar için kullanımının uygun olduğu görüşüne varılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, mikronize kalsit inceliğinin ve miktarının artmasıyla söz konusu beton numunelerinin erken dayanımının arttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca karışımlarda imento miktarının artmasıyla hem Kalsiyum Alüminatlı imento ile hem de Portland imentosu ile üretilen numunelerde dayanım artışı olduğu grlmştir. Diğer taraftan betonların içerdikleri ince malzeme oranının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Erken dayanımı yüksek beton, mikronize kalsit, silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı katkı, uucu kl.

**Bilim Kodu :** 91127

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **CHARACTERISTICS OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE WITH GRANULATED FURNACE SLAG**

**Nur ÜNAL**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Şenol GÜRSOY**

**January 2022, 85 pages**

The most preferred building material in the world today is concrete. Studies conducted in recent years have revealed special types of concrete with longer life, higher early strength and better mechanical properties. In addition, with these studies, special terms such as high strength, ultra-high strength and reactive powder concrete have been started to be used. With the development of technology these special types of concrete emerged, present; It is widely used in high-rise constructions, dams, repair and discharge channels of dams, offshore platforms, industrial flooring, abrasion resistant road concrete, water structures and large projects that are planned to have a very long life (100 years).

In this thesis study, the effect of micronized calcite in flowable concrete with high early strength was investigated. For this purpose, the properties of concrete produced by using industrial waste materials such as silica fume, microcalcite, fly ash as

binding materials and superplasticizer additives were experimentally examined. In this context, the advantages of flowable concrete, usage areas, fresh and hardened concrete properties were investigated. As a result of the experimental studies conducted, concrete samples with high early strength were obtained and it was concluded that they are suitable for use especially for prefabricated structures.

The results obtained from this study reveal that the early strength of the aforementioned concrete samples increases with the increase of micronized calcite fineness and amount. In addition, with the increase in the amount of cement in the mixtures, it was observed that there was an increase in strength in the samples produced with both Calcium Aluminate Cement and Portland Cement. On the other hand, it was observed that the setting times of the concretes increased with the increase in the fine material proportion of concretes.

**Key Word** : Micro calcite, silica fume, superplasticizer additive, fly ash, ultra-high strength concrete, high strength concrete.

**Science Code** : 91127

## TEŞEKKÜR

Erken dayanımı yüksek akıcı betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması isimli bu tez çalışmasını bana önererek, yoğun çalışmalarına rağmen, tez çalışmamın başlangıcından yazımına kadar her aşamasını takip eden, her türlü olumsuz koşulda beni motive eden, engin bilgi birikimi ve emeğini eksik etmeyen, bana araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşıl原因, çalışmamın her safhasında derin tecrübesinden yararlanma imkânı bulduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şenol GÜRSOY'a ve deneysel çalışmam sırasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Doç. Dr. İlker Tekin'e teşekkür ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim.

Bu çalışmamızın tez jüri üyeliğini kabul eden Sayın Özlem SALLI BİDECİ'ye ve Sayın Doç. Dr. İlker Tekin'e zahmetlerinden ve katkılarından dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca bu tez çalışmamıza her türlü ekipman ve malzeme desteği sağlayan Yılmaz Beton sahibi Salih YILMAZ'a, laboratuvar sorumlusu Bora ÇOBAN'a ve deneysel çalışmamada yardımcı olan kardeşim İnşaat Mühendisi Elif ER'e çok teşekkür ederim.

Burada, eğitim-öğrenimim boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarımı saygı ile anarken, tez çalışmam süresince beni her koşulda destekleyen fedakâr eşim Orhan ÜNAL'a ve oğlum Adnan Emir ÜNAL'a ve tüm aile fertlerine, özellikle bugünlere gelmemi sağlayan anne ve babama, sonsuz müteşekkir olduğumu belirtir ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmamın ülkemize faydalı olmasını canı gönülden dilerim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                           |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| KABUL .....                                               | ii   |
| ÖZET.....                                                 | iv   |
| ABSTRACT.....                                             | vi   |
| TEŞEKKÜR.....                                             | viii |
| İÇİNDEKİLER .....                                         | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                      | xi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                   | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                      | xiv  |
| <br>                                                      |      |
| BÖLÜM 1. ....                                             | 1    |
| GİRİŞ .....                                               | 1    |
| 1.1. KONUYLA İLGİLİ GEÇMİŞTE YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR..... | 4    |
| 1.2. TEZ ÇALIŞMASININ AMAÇ VE KAPSAMI.....                | 7    |
| <br>                                                      |      |
| BÖLÜM 2. ....                                             | 8    |
| YÜKSEK DAYANIMLI AKICI BETONLAR.....                      | 8    |
| 2.1. YÜKSEK DAYANIMLI BETON .....                         | 8    |
| 2.2. AKICI BETONLAR.....                                  | 8    |
| 2.3. AKICI BETONLARDA KULLANILAN MALZEMELER .....         | 9    |
| 2.3.1. Çimento.....                                       | 9    |
| 2.3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ) .....                    | 9    |
| 2.3.1.2. Kalsiyum Alüminatlı Çimento (CAC) .....          | 12   |
| 2.3.2. Mineral Katkılar.....                              | 15   |
| 2.3.2.1. Silis Dumanı (SD) .....                          | 15   |
| 2.3.2.2. Uçucu Kül (UK) .....                             | 18   |
| 2.3.2.3. Kalsit .....                                     | 25   |
| 2.3.2.4. Kimyasal Katkılar .....                          | 29   |
| <br>                                                      |      |
| BÖLÜM 3. ....                                             | 31   |

|                                                                       | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|
| MALZEME VE YÖNTEM .....                                               | 31                  |
| 3.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER.....                               | 31                  |
| 3.1.1. Çimentolar .....                                               | 31                  |
| 3.1.2. Agregalar .....                                                | 32                  |
| 3.1.3. Mineral Katkılar.....                                          | 34                  |
| 3.1.3.1. Uçucu Kül .....                                              | 34                  |
| 3.1.3.2. Silis Dumanı.....                                            | 36                  |
| 3.1.3.3. Mikronize Kalsit.....                                        | 36                  |
| 3.1.4. Süperakışkanlaştırıcılar .....                                 | 37                  |
| 3.1.5. Karışım Suyu .....                                             | 37                  |
| 3.2. BETON KARIŞIM HESABI .....                                       | 37                  |
| 3.3. BETON NUMUNELERİNİN ÜRETİMİ .....                                | 39                  |
| 3.4. TAZE BETON DENEYLERİ .....                                       | 41                  |
| 3.4.1. Yayılma Deneyi.....                                            | 41                  |
| 3.4.2. Çökme Deneyi .....                                             | 43                  |
| 3.4.3. Kür Programı .....                                             | 44                  |
| 3.5. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ .....                                 | 45                  |
| 3.5.1. Basınç Dayanımı.....                                           | 45                  |
| <br>BÖLÜM 4. ....                                                     | <br>46              |
| DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN BULGULAR VE<br>DEĞERLENDİRMELER ..... | 46                  |
| 4.1. TAZE BETON DENEY SONUÇLARI.....                                  | 46                  |
| 4.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEY SONUÇLARI .....                           | 47                  |
| <br>BÖLÜM 5. ....                                                     | <br>75              |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                            | 75                  |
| KAYNAKLAR .....                                                       | 78                  |
| <br>ÖZGEÇMİŞ .....                                                    | <br>85              |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. SD katkı yüzdesiyle beton basınç dayanımının değişimi.....                                     | 17 |
| Şekil 2.2. Çatalağzı UK'ünün mineralojik bileşimine ilişkin X-ışınları difraktogramı.....                 | 19 |
| Şekil 2.3. Çatalağzı UK'ünün yüzey yapısına ait fotoğraflar.....                                          | 20 |
| Şekil 2.4. UK'nin betonun dayanım kazanma hızına etkisi .....                                             | 24 |
| Şekil 3.1. Agrega karışımlarının granülometri eğrisi .....                                                | 33 |
| Şekil 3.2. Beton numunelerinin üretiminde kullanılan betoniyer .....                                      | 40 |
| Şekil 3.3. Kalıplara doldurulan numunelerin durumu.....                                                   | 40 |
| Şekil 3.4. Betoniyer içindeki karışım durumu.....                                                         | 41 |
| Şekil 3.5. Beton numunelerinin yayılma deneyleri .....                                                    | 42 |
| Şekil 3.6. P3bll beton serisi çökme deneyi.....                                                           | 43 |
| Şekil 3.7. Üretilmeyen C3bll beton serisi.....                                                            | 44 |
| Şekil 3.8. Beton numunelerinin muhafaza edildiği kür havuzundan bir görünüm ..                            | 44 |
| Şekil 3.9. P4al serisinin basınç dayanım deneyinden bir görünüm.....                                      | 45 |
| Şekil 4.1. 125 mikron, 50 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları .....       | 50 |
| Şekil 4.2. 125 mikron, 100 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları .....      | 51 |
| Şekil 4.3. 10 mikron, 50 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları .....        | 52 |
| Şekil 4.4. 10 mikron, 100 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları .....       | 53 |
| Şekil 4.5. 300 kg çimento ve 50 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları .....  | 54 |
| Şekil 4.6. 400 kg çimento ve 50 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları .....  | 55 |
| Şekil 4.7. 300 kg çimento ve 100 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları ..... | 56 |
| Şekil 4.8. 400 kg çimento ve 100 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları ..... | 57 |

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.9. 300 kg çimento ve 125 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları .....                                                       | 58 |
| Şekil 4.10. 400 kg çimento ve 125 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları .....                                                      | 59 |
| Şekil 4.11. 300 kg çimento ve 10 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.....                                                        | 60 |
| Şekil 4.12. 400 kg çimento ve 10 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.....                                                        | 61 |
| Şekil 4.13. CAC ile üretilen beton serilerinin basınç dayanımlarına çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin etkisi.....             | 62 |
| Şekil 4.14. PÇ ile üretilen beton serilerinin basınç dayanımlarına çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin etkisi.....              | 63 |
| Şekil 4.15. Üretilen tüm beton serilerinin basınç dayanımlarına çimento türü, çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin etkisi.....   | 64 |
| Şekil 4.16. C4bll numunesinin farklı mikroskobik yapıların görünüşleri .....                                                                              | 65 |
| Şekil 4.17. C4bll numunesinin sem görüntüsü .....                                                                                                         | 65 |
| Şekil 4.18. C4bll numunesinin farklı EDS görüntüleri .....                                                                                                | 66 |
| Şekil 4.19. C4bll numunesinin diğer EDS görüntüleri .....                                                                                                 | 67 |
| Şekil 4.20. C4bll numunesinin EDS analiz grafiği .....                                                                                                    | 67 |
| Şekil 4.21. C4bll numunesi spot 1'in EDS analiz grafiği .....                                                                                             | 68 |
| Şekil 4.22. C4bll numunesi spot 2'nin EDS analiz grafiği .....                                                                                            | 68 |
| Şekil 4.23. C4bll numunesi spot 4'ün EDS analiz grafiği .....                                                                                             | 68 |
| Şekil 4.24. C4bll numunesi gehlenit formunun EDS analiz grafiği.....                                                                                      | 69 |
| Şekil 4.25. C4bll numunesinin spot 2'deki oluşmamış gehlenit formu karbonatlaşmış bir kalsiyum alüminat silikat hidrat yapısının EDS analiz grafiği ..... | 70 |
| Şekil 4.26. P4bll beton numunesinin sem görüntüsü .....                                                                                                   | 70 |
| Şekil 4.27. Reaksiyona katılmayan UK'lerin görünüşleri.....                                                                                               | 71 |
| Şekil 4.28. P4bll numunesinin EDS görüntüleri .....                                                                                                       | 71 |
| Şekil 4.29. P4bll numunesinin diğer EDS görüntüleri.....                                                                                                  | 72 |
| Şekil 4.30. P4bll numunesi spot 4'ün EDS analiz grafiği.....                                                                                              | 73 |
| Şekil 4.31. P4bll numunesi spot 1'in EDS analiz grafiği.....                                                                                              | 73 |
| Şekil 4.32. P4bll numunesi spot 3'ün EDS analiz grafiği.....                                                                                              | 74 |
| Şekil 4.33. P4bll numunesi spot 1'deki UK'nin EDS analiz grafiği.....                                                                                     | 74 |
| Şekil 4.34. P4bll numunesi çimento matrisi EDS analiz grafiği.....                                                                                        | 74 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Çimentonun ana bileşenleri .....                                                                           | 10 |
| Çizelge 2.2. Çimento ana bileşenlerinin özellikleri.....                                                                | 11 |
| Çizelge 2.3. CAC'nun sınıflarına göre kompozisyonları .....                                                             | 14 |
| Çizelge 2.4. CAC, PÇ ve kireç karışımlarının priz sürelerine etkileri.....                                              | 14 |
| Çizelge 2.5. SD'nin puzolanik aktivitesi ve su ihtiyacının, doğal puzolan ve uçucu kül ile karşılaştırılması.....       | 16 |
| Çizelge 2.6. F ve C sınıfı UK'lerin ve PÇ'sunun kimyasal özellikleri.....                                               | 21 |
| Çizelge 3.1. PÇ ve CAC'nin fiziksel analiz sonuçları.....                                                               | 31 |
| Çizelge 3.2. PÇ ve CAC'nin kimyasal analiz sonuçları .....                                                              | 32 |
| Çizelge 3.3. PÇ ve CAC'nin basınç dayanım sonuçları.....                                                                | 32 |
| Çizelge 3.4. Kaba agregaların özgül ağırlığı ve absorpsiyonu.....                                                       | 33 |
| Çizelge 3.5. Orta agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu .....                                                        | 34 |
| Çizelge 3.6. İnce agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu .....                                                        | 34 |
| Çizelge 3.7. Çatalağzı UK'nün kimyasal analiz sonuçları.....                                                            | 35 |
| Çizelge 3.8. Çatalağzı UK'nün kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....                                       | 35 |
| Çizelge 3.9. SD analiz sonuçları .....                                                                                  | 36 |
| Çizelge 3.10. Gantre 159 süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesinin analiz sonuçları...                                   | 37 |
| Çizelge 3.11. Beton numunelerinin 1 m <sup>3</sup> için karışım hesabı .....                                            | 38 |
| Çizelge 3.12. Beton numunelerinin kodları ve açıklaması .....                                                           | 39 |
| Çizelge 4.1. Akıcı taze betonların deney sonuçları .....                                                                | 46 |
| Çizelge 4.2. 15 seri beton numunesinin 3, 7, 28 ve 90 günlük deney sonucu elde edilen basınç dayanımını değerleri ..... | 47 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### KISALTMALAR

|            |                                              |
|------------|----------------------------------------------|
| ACI        | : American Concrete Institute                |
| ASTM       | : American Society for Testing and Materials |
| CAC        | : Kalsiyum Alüminatlı Çimento                |
| $D_{maks}$ | : En Büyük Agregada Dane Çapı                |
| DPT        | : Devlet Planlama Teşkilatı                  |
| KYB        | : Kendiliğinden Yerleşen Betonlar            |
| PÇ         | : Portland Çimentosu                         |
| S/B        | : Su / Bağlayıcı                             |
| S/Ç        | : Su / Çimento                               |
| SD         | : Silis Dumanı                               |
| TÇMB       | : Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği      |
| TS         | : Türk Standardı                             |
| UK         | : Uçucu Kül                                  |
| YFC        | : Yüksek Fırın Cürufu                        |
| YDB        | : Yüksek Dayanımlı Beton                     |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Beton, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Betonun, diğer yapı malzemelerine göre bazı avantajlara sahip olması tercih edilmesini ve yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Günümüzde inşaat sektöründeki gelişmelerle birlikte kaliteli betonlar elde edilebilmekte dolayısıyla beton sınıfları yükselmektedir. Ayrıca yüksek katlı ve geniş açıklıklı betonarme yapıların tercihinin artması yüksek dayanımlı beton ihtiyacını doğurmuştur. TS EN 206-1'e göre beton basınç dayanım sınıfları şu şekildedir; C50/60 ve aşağı sınıflar normal dayanımlı (geleneksel) betonlar, C50/60 üzeri beton sınıfları ise yüksek dayanımlı betonlar olarak tanımlanmaktadır (TS EN 206-1, 2002). Diğer taraftan yüksek dayanımlı betonlarda, basınç dayanımları ile birlikte elastisite modüllerinin de büyük olması yapılarda küçük kesitli yapısal elemanların kullanılmasına imkan sağlamaktadır (Voo vd., 2010). Bu hususlar yapı ağırlığında dolayısıyla deprem yükleri ve temel boyutlarında azalma sağlayarak daha ekonomik ve estetik yapı oluşturulmasına imkan vermektedir (Türker vd., 2016). Ayrıca yüksek dayanımlı betonlar, içyapılarının sıkı tane düzenine sahip olması nedeniyle geleneksel betonlara kıyasla daha yüksek durabilite özelliklerine sahiptirler. Bu husus da yapılara uzun ömürlülük sağlamaktadır (Aitchin, 2003; Voo and Foster, 2010).

Günümüzde geliştirilen yapı malzemeleri ile birlikte yüksek dayanımlı betonlar kendiliğinden yerleşen beton şeklinde de üretilebilmektedir. Diğer taraftan bazı araştırmacılar düşük su/çimento oranına, yüksek akışkanlığa (kıvama) ve dayanıma sahip olmalarından dolayı kendiliğinden yerleşen betonları yüksek dayanımlı betonlar olarak tanımlamaktadır (Bonavetti vd., 2003).

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) inşaat yapım süresini hızlandırmakta, akışkanlığı sayesinde donatılar arasına segregasyona uğramadan hızlı şekilde

yerleşmekte ve vibrasyon gerektirmemektedir. KYB, kıvamı ve yüksek homojenliğe sahip olması nedeniyle yapılarda daha az boşlukların oluşmasını, uniform dayanımı ve durabiliteyi sağlamaktadır. Ayrıca KYB, düşük su/çimento oranıyla erken basınç dayanımı, erken kalıp sökme, yapısal elemanlarının daha hızlı kullanılmasını imkan vermektedir (Okamura and Ouchi, 2003). Diğer taraftan düşük su/çimento oranı nedeniyle KYB'lerin yüksek akışkanlığa sahip olmaları için süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Bununla beraber malzemede su kuma ve ayrışmayı önlemek amacıyla yüksek akışkanlığın sağlanması gerekmektedir. Ayrıca betonun kararlılığının bozulmaması için viskoziteyi artırıcı maddelerin kullanılması ya da karışımındaki ince malzeme miktarının artırılması önerilmektedir. Felekoğlu'na göre küçük tane boyutuna sahip (0,125 mm'den küçük) uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı tozu, öğütülmüş cüruf gibi malzemeler kullanılabilir (Felekoğlu, 2003).

KYB üretiminde geleneksel betonlarda da kullanılan portland çimentoları kullanılabilir. Dünyada ve ülkemizde en çok kullanılan çimento türü portland çimentosudur. Portland çimentosu, sülfat ve klorür tuzu dayanımı nedeniyle deniz kıyı yapılarının inşaatlarında kullanılabilir ancak soğuk iklim koşullarında kullanılamamaktadır. Portland çimentosunun yetersiz kaldığı yerlerde, üstün performans gösteren kalsiyum alüminatlı çimento kullanılabilir (Scrivener, 2014). Diğer taraftan kalsiyum alüminatlı çimentonun portland çimentosuna göre farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle portland çimentosu ve kalsiyum alüminatlı çimentonun hidrasyon ürünlerinin birbirinden farklı olması, priz alma ve dayanım kazanma özelliklerini etkilemektedir (Scrivener and Capmas, 1998; Scrivener vd., 1999).

KYB'lerin akıcılık özelliği mineral katkılarıyla sağlanmaktadır. Mineral katkıları geleneksel betonların da özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikteki mineral katkıları çimentoyla yer değiştirilerek de kullanılabilir. Bunlardan silis dumanı en yaygın olarak kullanılan puzolanik mineral katkıdır. Ayrıca bunların daha büyük taneli çimentoyla birlikte kullanılmaları granülometriyi iyileştirerek daha az boşluklu iç yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ancak silis dumanının beton içerisinde mineral katkı malzemesi olarak belirli oranda kullanılması gerekmektedir. Bununla

birlikte işlenebilirliğe negatif etkisi olan silis dumanı sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca silis dumanı, belirli miktarlarda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların işlenebilirliğini kontrol altında tutmak için de kullanılabilir. Diğer taraftan silis dumanının erken dayanıma etkisi olmamakla birlikte geç dayanıma etkisi olmaktadır.

Puzolanik etki gösteren mineral katkılardan biri de uçucu küldür. ASTM C618 standardına göre uçucu küller iki tiptir (ASTM C618, 1998). ASTM C618 göre F ve C tipi olarak ikiye ayrılan uçucu küllerin ikisi de puzolanik özellik göstermekte, ancak bunlardan C tipi bir miktar bağlayıcılık özelliği de göstermektedir. Uçucu kül daha az miktarda suyla işlenebilirliğe, daha az terlemeye ve rötreye neden olmaktadır. Diğer taraftan kullanılacak uçucu külün, fiziksel-kimyasal özellikleri ve içeriğindeki yanmamış karbon miktarı önemlidir. Çünkü bu husus uçucu külün nihai dayanımını olumlu etkilemektedir.

Uçucu kül, silis dumanı, mikrokalsit, tras ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkılar atık maddeler olduğu için beton karışımında kullanımları çevre için de faydalı olmaktadır. Bunlardan atık malzeme olan kalsitin mineral katkı maddesi olarak kullanımı yukarıda belirtilen diğer katkılar kadar yaygın değildir. Ayrıca mikronize kalsitin beton karışımında homojen dağılımının sağlanması gerekmektedir. Özellikle çimentoyla birlikte karıştırılıp beton karışımına ilave edilmesi topaklanmayı önlediği için uygun olmaktadır. Mikroyapı incelemesiyle yapılan çalışmalarda, önce çimento ve taş tozunun karıştırılıp, daha sonra agreganın ilave edilmesiyle en iyi performans elde edilmiştir (Akkaya ve Kesler, 2012). Akkaya ve Kesler, kalsitin betonun dayanım kazanma hızına etkisini, C-S-H oluşumuna uygun çekirdek oluşturarak hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırması ve  $C_3A$ 'sı yüksek çimentolarla reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olan karboalüminat oluşturmasıyla ifade etmişlerdir.

Ülkemizde son yıllarda süperakışkanlaştırıcı katkıların yanında polikarboksilat esaslı katkılar da kullanılmaktadır. Çünkü polikarboksilat esaslı katkılar beton karışımında su miktarının düşmesine neden olduğundan söz konusu betona yüksek dayanım kazandırmaktadır. Ayrıca bunlar işlenebilirlik ve yüksek segregasyon direncine de

sahiptirler. Sonuç olarak işlenebilirliğin artırmasıyla kalıp alma süresi azalmakta ve böylece inşaat hızı artmaktadır.

Yapılan tez çalışmasıyla bağlayıcı malzeme olarak mikronize kalsit, uçucu kül ve silis dumanı kullanılmasıyla erken dayanımı yüksek olan akıcı beton üretimi hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı kalsit miktarı (50 ve 100 kg), kalsit inceliği (10 ve 125 mikron boyutlu) ve çimento dozajı (300 ve 400 doz) kullanılarak 15 seri beton üretilmiştir. Ayrıca tüm deneylerde su/çimento oranı 0,35 ve toplam bağlayıcı miktarı ise 600 kg olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerle üretilen beton numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca 90 günlük numuneler etüvde kurutulmuş ve bunların da basınç dayanımları tespit edilmiştir.

### **1.1. KONUYLA İLGİLİ GEÇMİŞTE YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR**

Ülkemizde yüksek dayanımlı betonlar üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir. Ancak yürürlükteki “*Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*” TS-500 standardı yüksek dayanımlı betonları kapsamamaktadır (TS-500, 2000). Ayrıca yapılan teknik literatür araştırmasında, ülkemizde çeşitli boyutlarda mikro kalsitin portland ve alüminatlı çimento ile birlikte kullanımının betonun erken dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen doğrudan herhangi bir tez çalışmasına rastlanmamıştır. Durum böyle olunca bu tez çalışmasında erken dayanımı yüksek olan akıcı betonların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yüksek dayanımlı akıcı betonlara ilişkin doğrudan ya da dolaylı olarak inceleyen bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Sağlam vd., (2004) yaptıkları çalışmalarında çimento-katkı uyumunu, polikarboksilat esaslı 6 farklı katkı, 1 adet CEM II 42.5 ve 3 farklı fabrikadan temin edilen CEM I 42.5 çimentoların karışımı ile üretilen betonların taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak bazı çimento türleri ile katkılar arasında çimento-katkı (hızlı kıvam kaybı) uyumsuzluğuna rastlanıldığını, ancak çimento hamuru ve beton deneyleri arasında belli bir ilişki tespit edilemediğini belirtmişlerdir.

Aruntaş vd., (2007) yaptıkları çalışmalarında atık mermer tozunun kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak atık mermer tozunun KYB üretiminde çimento yerine %15~20 oranlarında ikame edilebileceğini ve bu durumun basınç dayanımına olumlu yönde katkı sağladığını, ancak mineral katkı olarak kullanıldığında ise taze betonun kohezyonunu arttırdığını belirtmişlerdir.

Akkaya ve Kesler (2012) yaptıkları çalışmalarında, endüstriyel atık maddesi olan mikron boyutlu kalsitin, puzolanik madde olan silis dumanı ve uçucu kül ile yerdeğiştirmesinin betonun erken ve ileri yaş mekanik özelliklerinin taze haldeki işlenebilirlik ve dayanıklılığına etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak mikro kalsitli betonların erken yaş dayanımlarının daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca bunların silis dumanı ve uçucu kül içeren betonlara kıyasla daha geçirimli ve sülfat dayanıklılığının düşük olduğunu dolayısıyla kullanım yerlerinin özenle seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Tohumcu ve Bingöl (2013) çalışmalarında, çimento yerine belirli oranlarda, mineral katkı maddesi olan, silis dumanı ve uçucu kül kullanarak kendiliğinden yerleşen beton üretmişlerdir. Bu amaçla ürettikleri kendiliğinden yerleşen taze beton özelliklerini ve sertleşmiş betonların 3, 7 ve 28 günlük dayanımlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak en yüksek basınç dayanım değeri %15 oranında silis dumanı içeren beton numunelerden elde edildiğini ve silis dumanının ileri yaş basınç dayanımına daha fazla etkisi olduğunu, ancak uçucu kül ile birlikte basınç dayanımlarında azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

Ünal (2013) çalışmasında, kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı betonun üzerinde su/çimento oranı, kireç taşı tozu, silis dumanı, katkı türü ve miktarının etkilerini araştırmıştır. Araştırmasının sonucunda silis dumanı ile 600 kg/m<sup>3</sup> üzerinde toz malzemenin daha fazla süperakışkanlaştırıcı katkı ilavesine ihtiyacı olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca kireç taşı tozunun betonun işlenebilirliğine katkı sağladığı ve su/bağlayıcı oranının 0,275~0,280 ve üstü değerlerde yüksek basınç dayanımına olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşmıştır.

Boğa vd., (2014) çalışmalarında, mermer tozunu çimento ile ikame ederek kendiliğinden yerleşen beton üretmeyi hedeflemişlerdir. Gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarının sonucunda 30 MPa üzerinde basınç dayanımlarını elde etmişlerdir.

Gödek vd., (2015) yürüttükleri çalışmalarında 3 farklı polikarboksilat esaslı katkının çimento hamurunun reolojik davranışına etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak kullandıkları ve 3 farklı kodla kodladıkları (ga, sv ve bs) polikarboksilat katkılarından, sv'nin geleneksel betonlar için en uygun katkı olduğunu ifade etmişlerdir.

Akçaözoğlu ve Güldür (2017) çalışmalarında, mikronize kalsit ve uçucu kül mineral katkısının birlikte kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak kalsitin erken yaş dayanımına katkısının olduğunu ancak mineral katkı malzemesi olarak tek başına kullanılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Yılmaz vd., (2018) çalışmalarında, farklı oranlarda (%25 ve %100) kullandıkları pomza agregası, CEM I 42.5 ve kalsiyum alüminat çimentosu ile ürettikleri hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak CAC ve pomza agregası ikameli serilerin dayanımlarında artış olduğunu buna karşın kırmataş agregası içeren serilerin basınç dayanımlarında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca en yüksek basınç dayanımını %100 kırmataş ve Cem I 42.5 içeren beton numunelerinden elde etmişlerdir.

Bekem Kara (2020) çimentonun çevresel etkisini azaltmak amacıyla çalışmasında, mikronize kalsiti belirli oranlarda çimentoyla ikame etmiştir. Sonuç olarak %10'a kadar kullanılan mikronize kalsitin betonun basınç dayanımını arttırdığını ve kalsitin beton basınç dayanıma olumlu etkilerinin olduğunu, ancak betonun dayanıklılık boyutunun incelenmesi gerektiğini önermiştir.

Tuyan vd., (2020) çalışmalarında, kalsiyum alüminatlı çimentoyla uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun yer değiştirmesiyle oluşan kalsiyum alüminatlı harcın dayanıklılık, mekanik ve termal özellikleri incelemişlerdir. Sonuç olarak uçucu kül

ve yüksek fırın cürufunun çimento yerine kullanılmasıyla oluşan harcın ekolojik anlamda çevreye katkı sağladığını, uçucu kül içeren karışımların yüksek fırın cürufu içeren karışımlara göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu vurgulanmıştır.

## 1.2. TEZ ÇALIŞMASININ AMAÇ VE KAPSAMI

Günümüzde akıcı betonların kullanımı işlenebilirliği nedeniyle tercih edilmektedir. Akıcı betonlar denilince akla mineral ve süperakışkanlaştırıcı katkıları gelmektedir. Akıcı betonların içeriğinde yaygın olarak kullanılan silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi malzemelerin yanında, bu malzemelere göre temini daha kolay olan mikronize kalsitte kullanılabilir. Bu tez çalışması, **kalsitin inceliğinin akıcı betonların erken basınç dayanımına etkisinin olup olmadığı** hipotezinden çıkılarak yapılmıştır. Böylelikle erken dayanıma ihtiyaç duyulan sanayi yapıları, prefabrik yapılar, hızlı konut gereksinimi vb. gibi yapılarda kullanımı hedeflenmektedir.

Günümüzde maliyetlerin önemli olması ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının artması nedeniyle düşük dozajlı betonlarda yüksek basınç dayanımı elde etmek amacıyla bu tez çalışmasında 300~400 kg CEM I 42.5 portland çimento ve 300~400 kg kalsiyum alüminatlı çimento, polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı, mineral katkı maddesi olarak silis dumanı, uçucu kül, 10 ve 125 mikron boyutlarında mikro kalsit kullanılarak 15 seri beton numune üretilmiştir. Üretilen 15 seri beton numunesinden 14'nün yayılma çapları ve kalan 1 beton numunesinin çökme (Slump) değeri ölçülmüştür. Beton numuneleri 10x10x10 cm kalıplarda 3 gün kirece doymun suda ve 20±2 °C kür havuzlarında bekletilmiştir. Daha sonra söz konusu akıcı betonların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 90 günlük numuneler 100°C etüvde 24 saat bekletilerek basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Böylelikle söz konusu tüm bileşenlerin, üretilen akıcı betonların erken ve nihai dayanımını nasıl etkilediği araştırılarak bazı sonuçlar sunulmuştur.

## **BÖLÜM 2**

### **YÜKSEK DAYANIMLI AKICI BETONLAR**

#### **2.1. YÜKSEK DAYANIMLI BETON**

Yüksek dayanımlı betonlar, minimum 400 kg/m<sup>3</sup> çimento miktarına ve 28 günlük en az 50 MPa basınç dayanımı değerine sahip olan betonlar olarak tanımlanmaktadır (Phan, 2002). Yüksek dayanımlı betonların en temel özellikleri düşük su/çimento oranına sahip olması ve erken dayanımlarının yüksek olmalarıdır. Diğer taraftan betonların çeşitli dış etkiler nedeniyle hasara uğramaları önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu husus betonların tasarım koşullarında dayanımlarına ilave durabilitesinin de eklenmesiyle performansa göre tasarımın önemini daha da artırmaktadır. Bu nedenle dayanımları ile birlikte durabilitesi de yeterli olan yüksek dayanımlı betonlar, daha uzun hizmet ömrü istenilen yapılarda tercih edilmektedir. Bugün dünyada kullanımı giderek yaygınlaşan yüksek dayanımlı betonlar ülkemizde kullanımı maalesef istenilen düzeyde değildir. Bu nedenle ülkemizde TS 500 yapım standartlarına göre en yüksek beton basınç dayanımı değeri 50 MPa olarak verilmektedir (TS 500, 2000).

#### **2.2. AKICI BETONLAR**

1983'ten önce Japonya'da betonarme yapıları üretebilmek amacıyla daha fazla iş gücüne ihtiyaç duyulmuştur. İş gücünün sağlanamadığı durumlarda ise, söz konusu yapının dayanıklılığının zarar gördüğü ve/veya düşük kalitede yapıların üretildiği gözlemlenmiştir. Bu hususlar yeni beton formülleri ihtiyacını doğurmuştur. Bunun sonucu olarak da akıcı betonlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca akıcı betonların işlenebilirliğinin geliştirilmesi için Ozawa ve Maekawa tarafından Tokyo Üniversitesi ile iş birliği yapılarak önemli çalışmalar yapılmıştır (Okamura and Ouchi, 2003).

Akıcı betonlar akışkanlık özelliği ve kolay işlenebilirlikleri sayesinde çok kolay uygulanabilmektedir. Ayrıca yüksek homojenlikleri bunlarda iç yapı boşluklarını en az seviyede tutarak dayanıklılık sağlamaktadır. Diğer taraftan geleneksel betonlara kıyasla işlenebilirliklerinin fazla olması, sık donatılı bölgelerde kullanım kolaylığı sağlamakta dolayısıyla beton dökümü sırasında fazla işçiliğe gerek duymadan kendi ağırlığıyla kolayca yerleşmektedir. Akıcı betonlar günümüzde özellikle prefabrik yapılarda, betonarme güçlendirilmesinde, beton dökümü sırasında sık donatılı bölgelerde geleneksel betonların ayrışabileceği durumlarda tercih edilmektedir.

### **2.3. AKICI BETONLARDA KULLANILAN MALZEMELER**

#### **2.3.1. Çimento**

Çimento betonun en temel bileşenidir. Çimento tanecikleri suyla reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık göstermektedirler. Portland çimentosu ortaya çıkan ilk çimento türüdür. Çimentonun ana hammaddeleri kalker (kireçtaşı) ve kildir. Bunlardan kalkerli malzemeleri kireçtaşı ve marn iken killi malzemeleri ise yüksek silis içeren kil, şeyl ve şişt gibi maddelerdir (Özdemir, 2006). Bugün teknolojinin de gelişmesiyle yapılan araştırmalara bağlı olarak çimentodaki çeşitlilik artmaktadır.

##### **2.3.1.1. Portland Çimentosu (PÇ)**

Portland çimentosunun (PÇ'nin) üretimi, yapılan hesaplamalar sonucu bir araya getirilmiş kalker-kil karışımının dönerek fırında 1400 °C sıcaklıkta pişirilmesiyle ana ürünü klinker ile başlamaktadır. Klinkerin alçı taşı ve/veya mineral katkıları ile öğütülmesiyle PÇ elde edilmektedir. Çimentonun ana bileşenleri  $C_3S$  (Alit),  $C_2S$  (Belit),  $C_3A$  (Selit) ve  $C_4AF$  (Ferrit)'dir. Çimentonun ana bileşenlerinin isim ve kısaltmaları Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Çimentonun ana bileşenleri (Taylor vd., 2006).

| İsim   | Kimyasal Formül                                           | Kısaltma              |
|--------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Alit   | $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$                                | $\text{C}_3\text{S}$  |
| Belit  | $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$                                | $\text{C}_2\text{S}$  |
| Selit  | $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$                       | $\text{C}_3\text{A}$  |
| Ferrit | $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{C}_4\text{AF}$ |

Silikatlar, silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve kalsiyum oksit'in ( $\text{CaO}$ ) birleşmesiyle klinkerin %75'ini oluşturmaktadır. Trikalsiyum silikatın en önemli özelliği ise betonun erken dayanımına katkıda bulunmasıdır. Dikalsiyum silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ ), çimento hacminin yaklaşık %20'sini oluşturmakta ve betonun geç dayanıma katkısı büyük olmaktadır. Ayrıca alüminatlar, çimento içeriğinin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadırlar. Çimento üretiminde alçı taşının kullanılmasının temel nedeni ise,  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın çok hızlı bir şekilde tepkimeye girdiğinden bu husus alçı taşı ile kontrol edilmesinin amaçlanmasıdır.

Çimento içeriğinde ana bileşenler dışında birçok bileşen bulunmaktadır. Bunlardan en önemli olanlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- 1) Alkaliler ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )
- 2) Kükürt
- 3)  $\text{MgO}$
- 4)  $\text{Cl}$
- 5)  $\text{MnO}$
- 6)  $\text{TiO}_2$ 'dir.

Çimento ana ürünü olan klinkerin değirmende öğütülmesi sırasında çimentonun yaklaşık %5'i kadar alçıtaşı eklenmektedir. Alçıtaşının eklenmesinin önemli nedenlerinden biri de  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın hızlı tepkimesini kontrol etmek amacıyla yapılmaktadır.

Çizelge 2.2. Çimento ana bileşenlerinin özellikleri (Erdoğan, 2004).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Çimento Ana Bileşenlerin Özellikleri |                  |                  |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | C <sub>3</sub> S                     | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| <b>Reaksiyon Hızı</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Orta                                 | Yavaş            | Hızlı            | Orta              |
| <b>Hidratasyon Isısı</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Orta<br>120 kal/g                    | Az<br>62 kal/g   | Çok<br>207 kal/g | Orta<br>100 kal/g |
| <b>Bağlayıcılık Değeri</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                      |                  |                  |                   |
| İlk zamanlarda                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Yüksek                               | Düşük            | Düşük            | Düşük             |
| Sonunda                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Yüksek                               | Yüksek           | Düşük            | Düşük             |
| <p>(1) Bu çizelgede bileşen özellikleri göreceli olarak verilmiştir. C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF'nin özellikleri çizelgeye yansıtılırken, bu bileşenlerin hidratasyonunda alçıtaşının etkisi de gözönünde bulundurulmuştur.</p> <p>(2) İlk zamanlarda (ilk birkaç saat veya bir gün alındığında), C<sub>3</sub>A'nın katkısı <b>yüksektir</b>. Daha sonraki zamanlarda bu katkı <b>düşüktür</b>.</p> |                                      |                  |                  |                   |

Beton bileşenlerinin karıştırıldıktan bir süre sonra plastik özelliği kaybetmesine dolayısıyla katı bir yapıya dönüşmesini sağlayan çimento ile suyun kimyasal reaksiyona girmesi olayı hidratasyon olarak adlandırılmaktadır (Akman, 2003). Hidratasyon sürecinde su içerisinde çözünen çimento tanecikleri değişik hızlarda ve oranlarda reaksiyona girmekte ve ısı açığa çıkararak yeni ürünler ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca bu ürünler çimento hamurunun sertleşmesine ve agregaya tutunmasını da (aderans) sağlamaktadırlar. Çimentonun hidratasyon süreci 5 aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamaları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

1. aşama karıştırma sürecidir. Bu aşamada alçı ve alüminatlar suda çok hızlı çözünerek birkaç dakika içerisinde tepkimeye girmektedirler. Bu tepkime sonucunda yüksek ısı çıkışı meydana gelmektedir. Ancak ısı çıkışı kontrol edilmediği takdirde yalancı priz oluşmaktadır.

2. aşama uyku sürecidir. Bu aşamada jelimsi tabaka sayesinde alüminatların tepkimesi 2-4 saat arasında kontrol edilebilmektedir. Bu sürecin en önemlisi faydası betonun işlenebilirliğinin korunmasıdır. Böylece beton plastik halde taşınarak yerleştirilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Kimyasal katkılar bulunmadan PÇ ile hazırlanan betonun işlenebilme süresi yaklaşık 2 saattir.

3. aşama katılaşma (priz) sürecidir. Katılaşma sürecindeki en önemli olay priz başlangıcıdır. Priz başlangıcı, karışım suyunun kalsiyum iyonlarına aşırı doygun hale gelmesiyle yeni hidratasyon ürünlerinin ortaya çıkması şeklinde ve ısı yükselişiyle oluşmaktadır. Söz konusu reaksiyonun yavaş olması durumunda, uzun zamanda daha yoğun bir yapı meydana gelmektedir (C-S-H ve C-H'dan kaynaklı).  $C_3S$ 'in çözünmesi sonucu fiber yapıda C-S-H ve kristal yapıda C-H oluşmaktadır. Ayrıca  $C_3A$  ile sülfatın reaksiyonu bu süreçte devam etmekte ve etrenjit (C-A-S-H) oluşmaktadır. Diğer taraftan etrenjit oluşumuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü bu durum beton yapısında hacimsel değişimlere sebebiyet vermekte ve hacimsel değişimler sonucu betonda çatlak oluşturabilmektedir.

4. aşama soğuma sürecidir. Bu süreçte **topochemical** diye adlandırılan reaksiyon başlamaktadır (Taylor vd., 2006).  $C_3S$  reaksiyonu yavaşlamakta ve ısı miktarı azalmaktadır. Reaksiyonun yavaşlama nedeni, C-S-H ve C-H'nın su ve çimento tanelerinin temasını engellemesidir. Soğuma sürecince beton hala geçirimli yapıdadır ve rötre nedeniyle oluşan gerilmeler hızlı olabilmektedir. Bunu önlemek için uygun derz kesimlerinin yapılması gerekmektedir.

5. aşama yoğunlaşma sürecidir. Yoğunlaşma sürecinde ise reaksiyon yavaşlamakta ve buna bağlı olarak ısı çıkışı azalmaktadır. Ayrıca hidratasyon ürünleri artmaya devam etmekte ve söz konusu beton gittikçe daha sert ve sağlam bir yapıya dönüşmektedir. Böylelikle beton daha az geçirimli hale gelmekte ve donma-çözünmeden kaynaklı oluşabilecek olumsuz etkiler azalmaktadır.  $C_2S$ ,  $C_3S$  ile kıyaslandığında daha yavaş tepkimeye girmektedir. Bu nedenle bu süreçte  $C_2S$ 'in önemi daha büyüktür. Bu periyot ortamda su ile henüz hidrate olmamış çimento tanecikleri bulunduğu sürece devam etmekte ve söz konusu betonun uzun vadede dayanımı ve dayanıklılığı artmaktadır.

#### **2.3.1.2. Kalsiyum Alüminatlı Çimento (CAC)**

Bu çimento türü özel çimento türlerinin en önemlileri arasında yer almaktadır. Bunlar aynı zamanda PÇ'larına göre daha az silika ve daha çok miktarlarda alümina içermektedir. Kalsiyum alüminat çimentosu (CAC), PÇ'dan farklı alanlarda

kullanılmakla birlikte, ikisinin arasındaki en belirgin özellik hidrasyon sonucu açığa çıkan ürünlerin farklılığından kaynaklanmaktadır. Bu farklılık malzemenin priz alma ve dayanımını oldukça etkilemektedir. CAC'larda erken yaştaki dayanımı yüksek olmasına rağmen ileri yaş dayanımında azalmalar olduğu görülmektedir. Ancak CAC'nun PÇ'suna göre bazı üstün özellikleri bulunmaktadır. Bunlar; sülfat direnci, aşınma ve asit etkilerine karşı dayanıklılığıdır (Scrivener vd., 1999).

CAC'ların hidrasyonu sonucu açığa çıkan ürünler kalsiyum alüminat hidratlarıdır. Alüminat hidratlar ileri yaş dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Bu husus beton karışımı içerisinde kullanılacak olan CAC yerine ikame edilebilecek ürünler ile dayanımdaki azalmanın ortadan kaldırılabilmesi ve CAC'nun daha kullanılabilir hale dönüşmesini sağlayabilmektedir (Pacewska vd., 2011).

Collepari ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, % 20 ve % 40 oranlarında F tipi uçucu kül ile CAC ikamesi yapılarak betonlar üretilmiş ve 5°C, 20°C ve 40°C kür sıcaklığına bırakılmıştır. Sonuç olarak uçucu kül ikame edilen karışımlarda, dayanım kaybının yaşandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca F tipi uçucu kül, CAC'nun hidrasyon ürünü olan altıgen hidratın kübik hidrata dönüşümünü engelleyemediği için dayanımda azalma oluştuğunun ve birlikte kullanılmalarının uygun olmadığına kanısına varmışlardır (Collepari vd., 1995).

Kırca ve arkadaşları CAC'lu karışımlara yüksek fırın cürufu (YFC) ilavesinin kür sıcaklığına etkisini incelemişlerdir (Kırca vd., 2013). Bu amaçla CAC ile %80'e kadar YFC ikame edilerek oluşturulan beton numunelerini 20 °C ile 50 °C arasında kür koşullarına bırakmışlardır. Tüm kür sıcaklıklarında %40 oranında YFC ikame edilen betonlarda ileri yaşıta dayanımın kademeli olarak arttığını görmüşlerdir. Ayrıca %60 ve %80 oranlarında ikame edilen YFC'lu betonların dayanımlarında düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak düşük kür sıcaklıklarında yüksek kür koşullarına göre dayanım düşüşlerin daha belirgin olduğunu ifade etmişlerdir (Kırca vd., 2013).

CAC'nun kimyasal ve fiziksel özelliklerini şu şekilde özetlemek mümkündür. CAC kalsiyum monoalüminat (%50~55 CA), mayenit (%1~3 C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>), gehlenit (%1~15

C2AS), Ferrit (%12~20) fazlarından oluşmaktadır. CAC'nun sınıflarına göre kompozisyonları Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3. CAC'nun sınıflarına göre kompozisyonları (Sucu ve Delibaş, 2015).

| Sınıf                        | Renk             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO | TiO <sub>2</sub> | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O |
|------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------------------------------------|------------------|------|-------------------|------------------|
| St. Düşük alümina            | Gri, soluk siyah | 36-42                          | 36-42 | 3-8              | 12-20                               | <2               | ~1   | ~0,1              | ~0,15            |
| Düşük alümina<br>Düşük demir | Gri, açık gri    | 48-60                          | 36-42 | 3-8              | 1-3                                 | <2               | ~0,1 | ~0,1              | ~0,05            |
| Normal alümina               | Beyaz            | 65-75                          | 25-35 | <0,5             | <0,5                                | <0,05            | ~0,1 | <0,3              | ~0,05            |
| Yüksek alümina               | Beyaz            | >80                            | <20   | <0,2             | <0,2                                | <0,05            | <0,1 | <0,1              | ~0,05            |

CAH<sub>10</sub> ve C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> gibi altıgen şekilli kalsiyum alüminat hidratlar ve beraberindeki AH<sub>3</sub> gibi alüminyum hidroksitler, 20~25 °C oda sıcaklığında oluşan hidratasyon sonucu açığa çıkan ürünlerdir. CAH<sub>10</sub> ve C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> hidratları yarı kararlı yapıdadır. Bu ürünler yüksek sıcaklık ve nem koşullarında kübik C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> ve AH<sub>3</sub>'e dönüşmektedir. Ortaya çıkan bu dönüşüm bağlayıcı malzemenin dayanımındaki azalmanın nedenidir (Scrivener ve Capmas, 1998; Pacewska vd., 2011). Ayrıca yarı kararlı hidratların dönüşüm oranı su/çimento oranına da bağlı olmaktadır. Su/çimento oranı 0,4'ün altındaki oranlarda dönüşüm oranı azalmaktadır (Scheinherrova ve Trnik, 2017).

PÇ, CAC ve kireçtaşı karışımlarının priz sürelerine etkileri Çizelge 2.4'te verilmektedir.

Çizelge 2.4. CAC, PÇ ve kireç karışımlarının priz sürelerine etkileri (ÇİMSA, 2021).

| Karışım                     | ISIDAÇ 40 | PÇ  | ISIDAÇ 40 ve PÇ karışımı | ISIDAÇ 40 ve kireç karışımı |
|-----------------------------|-----------|-----|--------------------------|-----------------------------|
| Priz başlama süresi (dak.)  | 280       | 230 | 14                       | 60                          |
| Priz sonlanma süresi (dak.) | 295       | 280 | 19                       | 80                          |

### 2.3.2. Mineral Katkılar

Akıcı betonların en önemli özelliği olan akıcılığı (kıvamı) genellikle mineral katkılarla sağlanmaktadır. Diğer taraftan mineral katkılar geleneksel betonların özelliklerini iyileştirmek için de kullanılmaktadır. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikteki mineral katkılar çimento ile yer değiştirilerek kullanılabilir.

#### 2.3.2.1. Silis Dumanı (SD)

Silis dumanı (SD), silisyum veya demir alaşımlarının ergime yöntemiyle üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1µm'den küçük küresel, amorf, camsı silis (SiO<sub>2</sub>) partiküllerinden oluşan ve yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip olan bir yan üründür. Silikon metalinin soğutulup yoğunlaştırılma işlemi sonucunda elde edilen, %85~98 oranında silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşmakta olup, oluşan malzemeye *yoğunlaştırılmış silis dumanı* ya da *silis dumanı* adı verilmektedir. SD yüksek reaktiviteye ve aşırı ince parçalara sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahiptir ( $\geq 100$  MPa). Aynı zamanda bunlar erken dayanımı yüksek betonlar üretmek için süper akışkanlaştırıcılarla birlikte de kullanılmaktadır (Güneşli, 2008).

SD'nin rengi içeriğindeki karbon miktarına bağlı olarak açık griden koyu griye değişmektedir. Diğer bir ifadeyle karbon miktarı arttıkça renk koyu griye dönmektedir. Beton içeriğinde kullanılan silis dumanının özgül ağırlığı genellikle 2,2~2,3 arasında değişmektedir.

SD çok ince yapılı olmasından dolayı su ihtiyacı oldukça fazladır. SD için gerekli su ihtiyacı, diğer puzolanların (uçucu kül ve doğal puzolanlar) üst sınırlarının da üzerindedir. Çizelge 2.5'te SD'nin puzolanik aktivitesi ve su ihtiyacı için gerekli sonuçlar, doğal puzolan ve uçucu külden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.5. SD'nın puzolanik aktivitesi ve su ihtiyacının, doğal puzolan ve uçucu kül ile karşılaştırılması (Erdoğan, 2003).

|                                                                      | ASTM C618'in Sınırları |                    |                    |     |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-----|
|                                                                      | Doğal puzolan          | F sınıfı uçucu kül | C sınıfı uçucu kül | SD  |
| Dayanım aktivite indisi 28 günde kontrol numunesine oranla % minimum | 75                     | 75                 | 75                 | 110 |
| Su ihtiyacı kontrol numunesinin % maksimum                           | 115                    | 105                | 105                | 134 |

SD tanelerinin aşırı ince olmasından dolayı betonun su ihtiyacının arttığı bilinmektedir. Bu nedenle SD kullanılarak yapılan beton karışımlarında, daha az su kullanmak amacıyla, yüksek oranda su azaltıcı katkı malzemelerinin kullanılması gerekliliği doğmaktadır (Erdoğan, 2003). Bu nedenle yüksek oranda su azaltıcı, süper akışkanlaştırıcı olarak adlandırılan, katkıların kullanımları artmıştır.

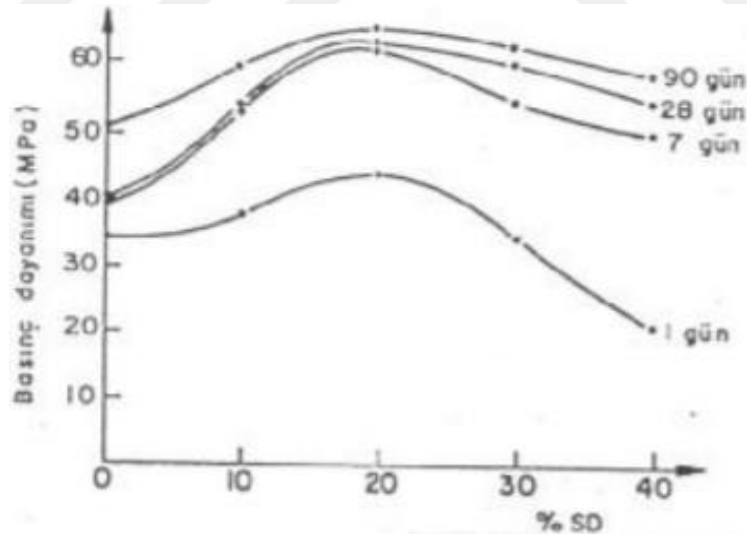
SD içeren betonlar, sadece PÇ'suyla yapılmış betonlara göre daha kohezif (*birbirine bağlı*) yapıda olmaktadır. Yüksek kohezyon ve ince taneciklerin aralarında daha çok temas olmasından dolayı SD içeren betonların işlenebilirliği daha azdır. Beton içerisindeki SD oranı çimentonun %5'inden yukarı çıktıkça, beton daha yapışkan bir kıvama sahip olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Duval ve Kadri çalışmalarında, düşük su/bağlayıcı (S/B) oranında ve süper plastikleştirici kullanılan beton karışımlarında, SD'nın çimentoyla %10 oranında yer değiştirmesinin işlenebilirliği azaltmadığını belirtmişlerdir (Duval ve Kadri, 1998).

Beton içerisindeki çimento ağırlığının %7~10'u arasında SD kullanılarak yapılan karışımların priz süreleri, katkısız üretilen betonlarla çok farklılık göstermemektedir. Ancak daha fazla oranda SD kullanımı, priz süresini uzatabilmektedir (Erdoğan, 2003; Khayat and Guizani, 1997).

SD kullanılarak elde edilen çimento hamurları daha geç priz almaktadır. Ancak mineral katkı çimento ağırlığının %10'unu geçmediği sürece bu etki önemsenmeyebilir. Ayrıca SD kullanımı süperakışkanlaştırıcı katkı ihtiyacını doğurmakta bununla beraber bu katkıların da priz süreleri üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Çimento miktarının %7~10'u kadar SD kullanımıyla yapılan beton karışımlarının ilk 72 saat içerisindeki hidrasyon ısı, SD kullanılmayan karışımlardan biraz daha fazla olabilmektedir. Ancak SD içeren betonlarda, SD içermeyen betonlara göre, yaklaşık %8~10'u kadar daha az miktarda hidrasyon ısı çıkmaktadır (Erdoğan, 2003).

SD'nın etkin bir puzolanik madde olması nedeniyle hidrasyon reaksiyonlarının hızlanmasını ve yoğun devam etmesini sağlamaktadır (Yeğinobalı, 1993). SD'nın betonun sertleşmiş özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Özellikle SD kullanımı betonda C-S-H jel oluşumunu artırdığından, çimento hamuru ve agrega arasındaki geçiş bölgesini sıkılaştırıp kuvvetlendirdiğinden beton dayanımını artırmaktadır (bkz. Şekil 2.1).



Şekil 2.1. SD katkı yüzdesiyle beton basınç dayanımının değişimi (Yeğinobalı, 1993).

SD'nın betonun erken yaş basınç dayanımına da etkisi çok belirgin olmaktadır (Şimşek, 2000; Mazloom vd., 2004). Normal bakım koşullarında bu etki 3~28 gün

arasında kendini göstermektedir. Ancak su/bağlayıcı oranını %40 civarına indirerek 1 günlük dayanımı yükseltmek mümkün olmaktadır (Khayat ve Aitcin, 1992).

Özcan (2005) çalışmasında, SD'nın basınç dayanımları üzerinde olumlu etkisinin karışım miktarlarına bağlı olarak 28. günden sonra daha yavaşladığını ifade etmiştir.

Pala vd., (2007) çalışmalarında, SD'nın betonun erken yaş basınç dayanımını artırdığını ancak ileri yaş dayanım kazanma hızının azaldığını belirtmişlerdir.

Yeğınobalı ve Erdoğdu (1999) betonda 28 günlük dayanım artmasını amaçlayan çalışmalarda, SD oranının %10~20 aralığında olduğunu ve yeterli işlenebilirlik için %10 üzeri miktarlarda süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanılması gerektiği ifade etmişlerdir (Yeğınobalı ve Erdoğdu, 1999).

Carette vd. yaptıkları çalışmalarda, SD'nın betonun ileri yaşlardaki olumlu etkilerini azalmakta olduğunu ve 90. günden sonra dayanım kaybı olabileceğini belirtmişlerdir (Carette vd., 1987)

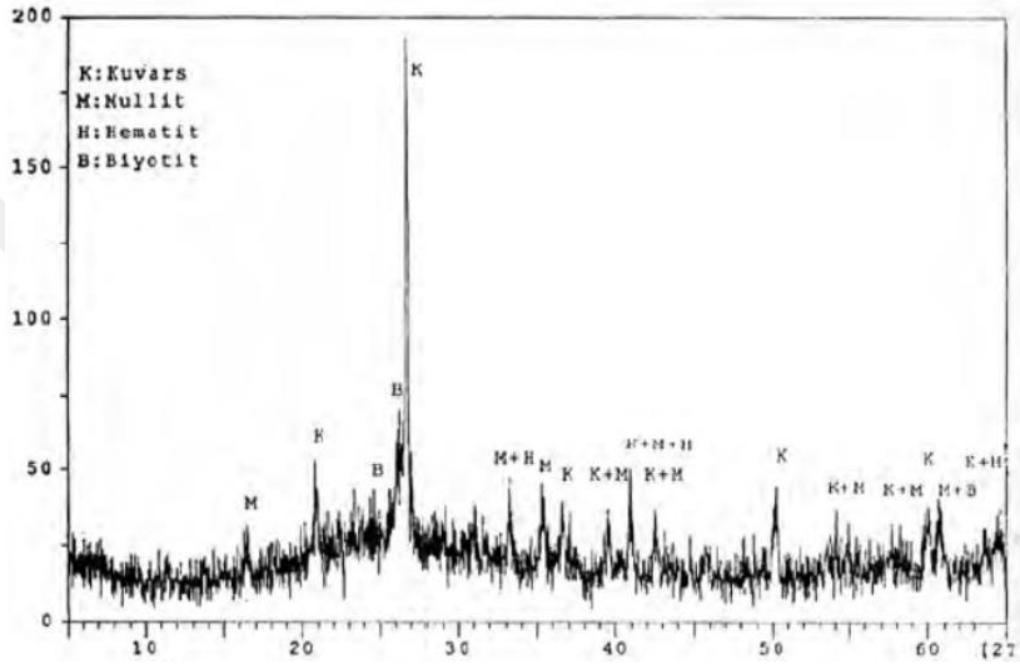
#### **2.3.2.2. Uçucu Kül (UK)**

Uçucu kül (UK), beton üretim teknolojisinde en çok kullanılan puzolandır. TS EN 450-1'e göre UK, pulverize (öğütölmüş) kömürün yakılmasıyla elde edilen, puzolanik özelliklere sahip, esas içeriğı SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten oluşan, reaktif kütlece en az %25'i SiO<sub>2</sub> olan küre şeklindeki camsı taneciklerden oluşan toz olarak tanımlanmaktadır (TS EN 450-1, 2013).

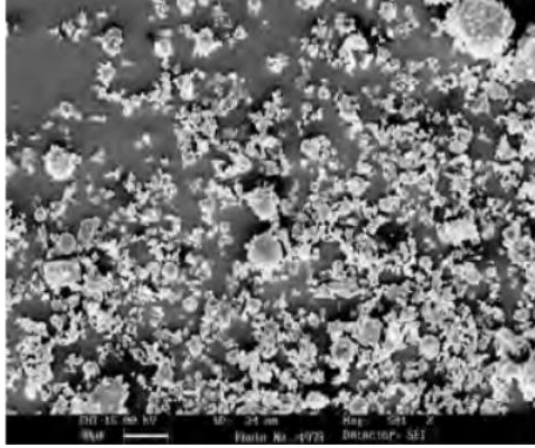
UK'ün kimyasal analizine bakıldığında içeriğinde büyük ölçüde (SiO<sub>2</sub>), alüminyum (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), demir (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kalsiyum (CaO), magnezyum (MgO) ve sülfür (SO<sub>3</sub>) elementlerinden oluştuğı görölmektedir. ASTM C 618 standardında UK'ler, içerdikleri SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranlarına göre F ve C tipi olarak iki gruba ayrılmaktadır. F tipi UK'ler antrasit ve bitümlü kömürün yanmasıyla ve C tip UK'ler ise linyit kömürünün yanmasıyla oluşmaktadır. F ve C tipi UK'lerin içeriğinde bulunan kalsiyum miktarı farklı özelliklere sahip neden olmalarına yol açmıştır.

Bunlardan C tipi UK'ler daha fazla kalsiyum içermesi nedeniyle hem bağlayıcı hem de puzolanik özelliklere sahiptir (ACI, 1987).

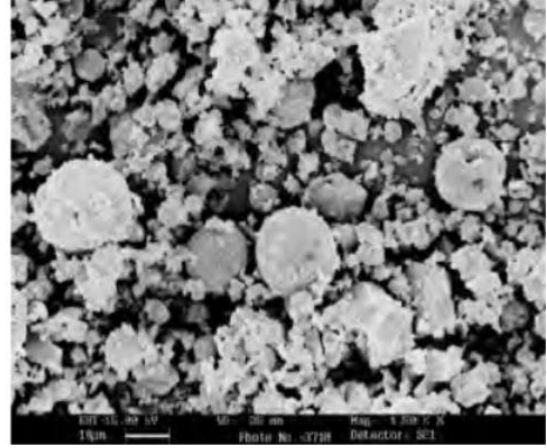
Bu tez çalışmasında beton üretiminde kullanılan Çatalağzı UK'nün mineralojik bileşimine ilişkin X-ışınları difraktogramı ve yüzey yapısına ilişkin fotoğraflar sırasıyla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilmektedir.



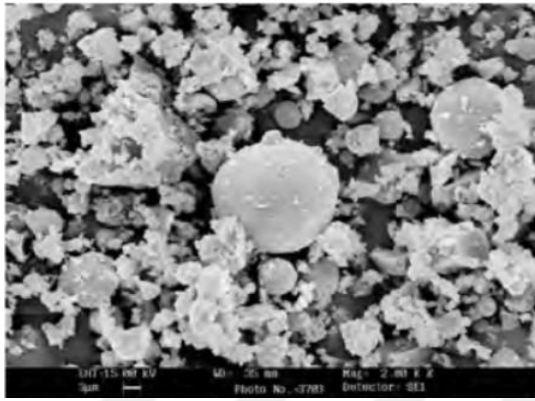
Şekil 2.2. Çatalağzı UK'nün mineralojik bileşimine ilişkin X-ışınları difraktogramı (Türker vd., 2009).



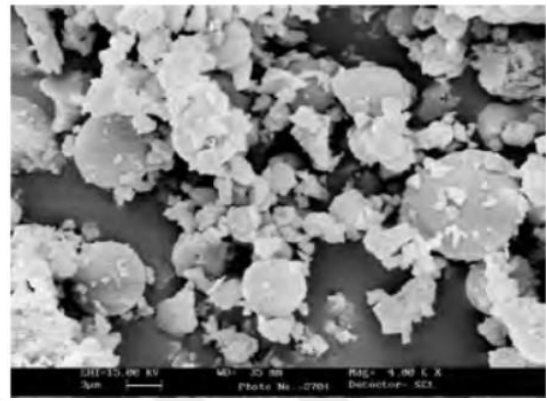
a) Taneciklerin genel dağılımı (x500)



b) Senosferler ve köşeli yapılar (x1500)



c) Tam küresel ve yüzeyinde kısmen birikintiler olan taneciklerden görünüm



Şekil 2.3. Çatalağzı UK'ünün yüzey yapısına ait fotoğraflar (Türker vd., 2009).

C tipi UK'ün aktif bileşeni kalsiyum alumino silikatlı cam ve F tipi UK'ün ise silisli camdır. Ayrıca F tipi UK'lerde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamı %70 ve üzerinde buna karşın C tipi küllerde ise %50 ve üzerindedir. Bu miktarın C tipi UK'de az olmasının nedeni ise bu tip küllerin %10'dan fazla CaO içermesinden kaynaklanmaktadır. CaO miktarı %10 ve üzeri yüksek kireçli, altında olan ise düşük kireçli olarak tanımlanmaktadır (ACI, 1998). Diğer taraftan kireç oranı yüksek olduğundan, linyit kömürü yakılmasıyla oluşan UK'ler bağlayıcılık özelliği göstermektedirler (Türker vd., 2009). F ve C tipi UK'lerin ve PÇ'sunun kimyasal özellikleri Çizelge 2.6'da özetlenmektedir.

Çizelge 2.6. F ve C sınıfı UK'lerin ve PÇ'sunun kimyasal özellikleri (Dodson, 1990).

| Kimyasal Bileşim                                                                 | PÇ (%) | F Sınıfı UK (%) | C Sınıfı UK (%) |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                 | 19,8   | 43,4            | 32,5            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                   | 6,1    | 18,5            | 21,9            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                   | 2,5    | 26,9            | 5,1             |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 28,4   | 88,8            | 59,5            |
| CaO                                                                              | 63,7   | 4,3             | 27,4            |
| SO <sub>3</sub>                                                                  | 2,2    | 1,2             | 2,8             |
| MgO                                                                              | 3,5    | 0,9             | 4,8             |
| Toplam Alkaliler<br>(Na <sub>2</sub> O Esdeğer)                                  | 0,9    | 0,6             | 1,1             |
| Kızdırma Kaybı                                                                   | 1      | 3,2             | 1,2             |
| Rutubet                                                                          | -      | 0,2             | 0,8             |

UK tanelerinin küresel ve ince yapıda olması, özgül ağırlığı, bileşimi ve boyut dağılımı, betonun karışım oranını, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini doğrudan etkilemektedir. UK'lerin tanecik şekilleri üretildiği kömürün yanma koşullarına bağlı olmaktadır. Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girdiğinde, bağlayıcı jel oluşmakta ve bu jeller söz konusu betonun boşluklarını doldurarak dayanım kazandırmaktadır.

Taze betonun kalıplara rahat yerleşebilmesi için işlenebilirlik özelliği oldukça önemlidir. Diğer taraftan UK'ün taze betonun işlenebilirliğine, su ihtiyacına ve dayanımı üzerine olumlu etkileri olmaktadır.

Brown çalışmasında, 4 farklı su / çimento (S/Ç) oranı kullanarak elde ettiği beton karışımlarında, UK'ün betonun işlenebilirliğine etkisini araştırmıştır. Çimento ile UK'ün aynı oranda yerlerini değiştirerek ürettiği beton numunelerinde, UK içeren betonların slump (çökme) ve işlenebilirliklerinde artış olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca bu değişimlerin, UK ve su miktarına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ifade etmiştir. Owens çalışmasında, UK içerisinde 45 µm'den büyük kaba taneler bulunmasının işlenebilirliği etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca %50'den daha fazla ince tanecik içeren UK'ün söz konusu karışımların su ihtiyacını azalttığını tespit etmiştir.

Ancak %50'den fazla kaba tanelerin olduğu karışımlarda su ihtiyacına olumlu etkisi olmadığını ifade etmiştir (Berry and Malhotra, 1986).

Uyan vd. (1996) yaptığı çalışmalarında, kül tanelerinin büyümesi ve yerdeğiştirme oranlarının artmasıyla taze betondaki su ihtiyacının %8 oranına kadar arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla beraber düşük yerdeğiştirme oranlarında (%10) incelik faktörünün su ihtiyacına etkisi görülmediğini ifade etmişlerdir. Ancak daha yüksek yerdeğiştirme oranlarında incelik faktörü etkisinin daha etkin bir biçimde görüldüğünü vurgulamışlardır (Uyan vd., 1996). Helmuth (1987) çalışmasında, UK'lerin çimento hamurunda ilave olarak kullanılması durumunda su ihtiyacının artabileceğini, çimento ile ikame edilerek kullanılması durumunda ise su ihtiyacını azaltabileceğini belirtmiştir.

Welsh ve Burton yaptıkları çalışmalarında, sabit su miktarıyla UK içeren betonların daha akışkan olduğunu ifade etmişlerdir. Pasko ve Larson yaptıkları çalışmalarında, 63 mm sabit slump değeri için %20 çimento ile %30 UK ikame edilerek su ihtiyacının %7,2 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Compton ve Malcniste çalışmalarında, %30 çimento ile ikame edilen UK içeren karışımların su ihtiyacında %7 azalma gözlemişlerdir (Berry and Malhotra, 1986).

Olek ve Diamond yaptıkları çalışmalarında, F ve C tipi UK kullanarak 2 farklı tipe ikame yoluyla üretilen beton numunelerinde, referans betonuna göre su ihtiyacının azaldığını ve işlenebilirliğinin arttığını gözlemlemişlerdir (Olek and Diamond, 1989). Haque vd., çalışmalarında yüksek kireçli C sınıfı UK ve hava sürükleyici katkı kullanarak ikame yöntemiyle ürettikleri beton numunelerde işlenebilirliğin arttığını gözlemlemişlerdir (Haque vd., 1988).

Erdoğan (2003) çalışmasında, UK içeren betonların işlenebilirliğinin arttığını belirtmiştir. Çünkü UK'ün yoğunluğunun PÇ'sundan daha az olması nedeniyle çimento yerine kullanımı betondaki bağlayıcı olan hamurun hacmini artırmaktadır. Daha geniş bir hacime sahip olan bağlayıcı hamur, taze betonda agrega taneleri arasında bulunan boşlukları daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır. Ayrıca

UK'ün küre şeklinde olması, söz konusu betonda iç sürtünmeyi azaltmakta ve akıcılığını artırmaktadır (Erdoğan, 2003).

Terleme olayı, beton karışımı içindeki suyun dışarı çıkması sonucunda oluşan bir durumdur. Terleme yaygın olarak segregasyon sonucu oluşmakta ve rötreye neden olmaktadır. Terlemeyi dolayısıyla segregasyonu önlemek için betonun yeterli kohezyonda olması gerekmektedir. Özellikle ince yapıda olan mineral katkıları taze betonda terlemeyi önlemekte ya da azaltmaktadır. Bu nedenle UK'ler çok ince yapıda olmasından dolayı betonda kohezyonu artırmakta, segregasyonu azaltmakta ve erken rötreyi de engellemektedir (Öner, 2005). Diğer bir ifadeyle UK'lerin çok ince yapıları nedeniyle taze betonun su ihtiyacı, işlenebilirlik ve terleme özelliklerini iyileştirmektedir.

Mineral katkı maddeleri genellikle priz sürelerini geciktirmektedir. Özellikle soğuk hava koşullarında bu durumun dikkate alınması gerekmektedir. Ancak C tipi UK ve SD kullanılarak yapılan bazı çalışmalarda içeriğe bağlı olarak priz sürelerinin etkilenmediği hatta hızının arttığı görülmüştür (Özturan, 1991).

Beton karışımında bulunan UK'ün priz süresinin artmasına sebep olduğunu vurgulamışlardır (Sivasundaram vd., 1989). UK'ün priz geciktirme nedeni olarak UK'ün karışım oranının, kimyasal bileşiminin ve inceliğinin etkili olduğunu ancak çimento inceliği, çimento hamurunun su miktarı ve ortam sıcaklığının daha etkin olduğunu ifade etmişlerdir. Berry and Malhotra, betonun priz süresine UK'den bağımsız, çimento ve S/Ç oranının etki ettiğini belirtmişlerdir. Buna göre çimento miktarı arttıkça priz süresi düşerken, S/Ç oranı arttıkça priz süresi artmaktadır (Berry and Malhotra, 1986).

Özetle, UK bulunan beton karışımların priz sürelerinde gecikme olduğu söylenebilir. Priz süresinin gecikmesindeki en önemli sebep, UK'ün pozolanik reaksiyonları sürdürebilmesi için çimento hidratasyon ürünlerinin oluşması gerekmektedir.

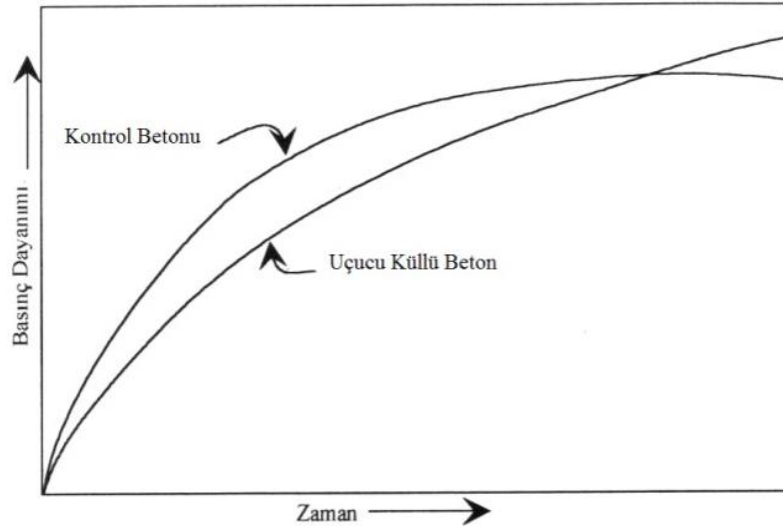
Çimento taneciklerinin su ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda ısı enerjisi ortaya çıkmakta ve bundan dolayı betonun sıcaklığı artmaktadır. Erdoğan

alışmasında, UK katkılı beton karışımlarında PÇ'sunun miktarının düşmesiyle söz konusu betonun hidratasyon ısısının, katkısız betonlara göre daha az olduğunu vurgulamıştır (Erdoğan, 2003).

Özetle, düşük kireçli uçucu küllerin hidratasyon ısını düşürdüğünü buna karşın yüksek kireçli uçucu küllerin hidratasyon ısısında çok önemli değişim yapmadığı söylemek mümkündür.

UK'ler betonun sertleşmiş özelliklerini de iyileştirmektedir. UK katkılı betonlar, referans betonlarına göre erken yaşta düşük dayanımda olmasına rağmen zamanla referans betonunun dayanımını geçmektedirler. Çünkü UK katkılı betonların erken yaş basınç dayanımının ileri yaş basınç dayanıma göre düşük olması puzolanik reaksiyonların geç başlamasıdır. Çünkü bağlayıcılık özelliği gösteren puzolanik reaksiyon ürünlerinin oluşmasını sağlamak için çimentonun hidratasyon ürünü olan CH'nin oluşması gerekmektedir.

F tipi UK'ler, C tipi UK'lere göre erken yaşlarda düşük dayanım vermektedir. Çünkü C tipi UK'lerin kireç oranlarının yüksek olması, erken yaşta mukavemet kazanma hızını artırmaktadır (Özturan, 1991).



Şekil 2.4. UK'nin betonun dayanım kazanma hızına etkisi (Gürbüz, 2009).

UK'lerin inceliği, tipi, kimyasal yapısı, reaktifliği betonların dayanımına önemli derecede etki etmektedir. UK katkılı betonların katkısız betonlara göre erken yaş dayanımı düşük ancak nihai dayanımı yüksek olmaktadır. Erken yaşlardaki dayanım artışı, uçucu külün tipine ve inceliğine göre değişkenlik göstermektedir (Erdoğan, 2003).

Mehta ve Gjorv yaptıkları çalışmalarında, %30 oranda F tipi UK ikamesi ile elde ettikleri beton numunelerin 7. ve 28. gündeki dayanımlarının düşük olduğunu ve söz konusu numunelerin dayanım değerlerinin ancak 90. günde referans betonuna erişebildiğini gözlemlemişlerdir (Mehta and Gjorv, 1982).

Yuan ve Cook yaptıkları çalışmada, betonun dayanım kazanma hızını yüksek kireçli UK içeren ve UK içermeyen beton numuneler üzerinde incelemişlerdir. Bu amaçla S/Ç oranı 0,45 ve %20, %30 ve %50 oranlarında UK ikamesi yapmışlardır. Deneyler sonucunda söz konusu numunelerin 28 güne kadar referans betonuyla aynı dayanıma sahip olduğunu, 28. günden sonra referans betonundan daha fazla dayanım kazandıklarını gözlemlemişlerdir (Berry and Malhotra, 1986).

Hassan vd., çalışmalarında, UK katkılı betonların erken yaşlarda düşük performans sergilediğini, ancak uzun dönemde silis dumanı içeren betonların dayanım özelliklerine ulaştığını ifade etmişlerdir (Hassan vd., 2000).

### **2.3.2.3. Kalsit**

Kimyasal formülü  $\text{CaCO}_3$  olan kalsit, karbonatlı kayalar oluşturan bir mineraldir. Kalsit, camsı parlaklıkta, saydam yapıda, renksiz ve çeşitli şekillerde kristalleşebilmektedir. Ayrıca kalsit, öğütülmesi halinde beyaz bir toz haline dönüşmektedir. Kalsitin kalitesini belirleyen 3 niteliği (kimyasal saflığı, çapı ve rengi) bulunmaktadır. Saf kalsitin sertliği Mohs skalasına göre 3 civarında olup, içerdiği silika miktarına göre 4'e kadar çıkmaktadır. Diğer taraftan kalsit, Türkiye'de üretilen kireç taşı, mermer ve tebeşir gibi mineral karbonatlı kayaların ana mineralidir (MTA, 2021).

Dünyada ise ticari amaçla üretilen kalsit oluşumları;

- 1) Beyaz renkli saf kireç taşları,
- 2) Beyaz renkli kalker,
- 3) Beyazlık oranı çok yüksek olan iri kristalli mermerler,
- 4) Beyaz tebeşir

şeklindedir. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde mermer ve kalsit yatakları bulunmaktadır. Bunlar; Çanakkale Karabiga bölgesi, Bayramiç, Biga, Ezine, Trakya Yıldız Dağları, Bursa Orhaneli, Bursa Orhangazi, Keles, İnegöl, İzmir Tire, Gölarmara, Akhisar, Torbalı, Muğla Yatağan, Kavaklıdere ve Niğde'dir.

En iri kristalli kalsit Çanakkale Karabiga bölgesinde bulunmaktadır. Ancak bunların Ege ve Niğde yöresinden çıkan malzemeye göre beyazlığı daha düşüktür. Bayramiç, Biga ve Ezine çevresinde mermer yatakları mevcuttur. Balıkesir, Erdek ve Manyas çevresinde çok fazla iri kristalli mermer yatakları ve mermer ocakları, Trakya Yıldız dağları ve Bursa Orhaneli çevrelerinde dolomitik ve normal mermer yatakları bulunmaktadır. Bursa Orhangazi, Keles ve İnegöl yörelerinde zengin mermer yatakları olmasına rağmen buralarda üretim çok düşüktür. Ayrıca İzmir Tire, Gölarmara, Akhisar ve Torbalı çevrelerinde mermer yatakları da bulunmaktadır. Muğla Yatağan ve Kavaklıdere yöresi kristal yapısı küçük dolayısıyla öğütülebilirliği çok kolay olan mermer yataklarına sahiptir.

Türkiye'deki kalsit yatakları arasında en beyaz oluşumlar Niğde'de bulunmaktadır. Aynı zamanda bölgede hammadde temini çok hızlı üretim yapılmaktadır (DPT, 2001). Türkiye'deki rezervlerde;

- 1) Silis, Magnezyum ve Demir gibi safsızlıkları çok düşük orandadır.
- 2)  $\text{CaCO}_3$  oranı yüksektir.
- 3) Öğütüldükten sonra beyazlıkları çok yüksektir.

Türkiye'de kalsit üretimi açık işletme yöntemiyle ocaklarda yapılmaktadır. Mevcut mermer yataklarında patlatma işlemi gerçekleştirildikten sonra maden ocağının

Üretim kapasitesine göre elle ayıklanmakta ya da 3 mm'lik elekten geçirildikten sonra stoklanıp ve/veya sevk edilmektedir.

Günümüzde kalsit; ahşap ve metal üretimi hariç tüm gıda, boya, kablo, kimya, plastik, kauçuk, kâğıt, yalıtım malzemeleri, seramik (60-100 mikron boyutlu), yapı kimyasalları, ilaç gibi çeşitli sektörlerde oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir. Ayrıca inşaat sektöründe sıva, derz dolgusu, macun ve alçı üretiminde de kullanılmaktadır. Diğer taraftan kömür santrallerinde hava kirliliğini önlemek amacıyla da kullanılabilmektedir.

Yapılan alışmalar, mikronize boyutlu kalsitin beton karışımlarına olumlu etkisinden dolayı kullanımının yaygınlaşacağını göstermektedir. Çimento esaslı beton karışımlarına kireçtaşının eklenmesi malzemenin birçok özelliğini iyileştirmektedir. Diğer bir ifadeyle bu durum karışımın yoğunluğunu artırmakta ve ara yer boşluklarını azaltmaktadır. Söz konusu betondaki bu değışimler kireçtaşının tane boyutuna bağlı olmaktadır (Fujiwara vd., 1996).

Beton dayanım kazanma hızına kalsitin etkisi, C-S-H oluşumuna uygun çekirdek meydana getirmesiyle hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırarak içeriğinde yüksek miktarda  $C_3A$  bulunan çimentolarla reaksiyonu sonucu bağlayıcı özellikte olan karboalminat oluşturmasıyla ile açıklanmaktadır (Petersson, 2002; Matschei vd., 2007).

Akkaya ve Kesler yaptıkları çalışmalarında, mikronize kalsiti mineral katkı malzemesi olarak beton karışımlarına ilave etmişlerdir. Çalışma sonucunda mikronize kalsitin betonun yayılma değerini olumsuz etkilediğini, ancak erken yaş beton dayanımlarında artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca kalsit içeren betonların silis dumanı ve uçucu kül içeren betonlara kıyasla kalıcılık özelliklerinin daha zayıf olduğunu ifade etmişlerdir (Akkaya ve Kesler, 2012).

Mermer tozu, taş unu ve kalsit içeren mineral katkılarla ilgili yapılan çalışmalarda, söz konusu malzemelerin %10~15 oranında ilavesiyle beton dayanım ve dayanıklılık

özelliklerini iyileştirme potansiyelini taşıdıkları vurgulanmıştır (Tanyıldızı ve Coşkun, 2011; Aruntaş vd., 2007; Ünal ve Kibici, 2001; Erdem ve Öztürk, 2012).

Yüksek akışkanlıktaki harçlarda S/Ç oranını 0,35~0,41 aralığında değiştirerek aynı zamanda %5~20 arasında çimento ve kireçtaşı'nın yerdeğiştirmesi akıcılıkta değişmeye neden olmaktadır (Nehdi and Mindess, 1998).

Yahia vd., çalışmalarında, %98'i kalsit olan kireçtaşı'nın etkinliğini S/Ç oranı ve kireçtaşı'nın içeriğinin etkilediğini ifade etmişlerdir. Buna göre 0,35~0,45 aralığındaki S/Ç oranlarıyla kireçtaşı katkı ilavesinin söz konusu malzemenin akıcılığına önemli bir etkisinin olmadığını, ancak kritik doz'un üzerinde kireçtaşı ilavesinin akıcılığa etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak kireçtaşı'nın betonun fiziksel özelliklerine etkisinin S/Ç oranı ve kireçtaşı miktarına bağlı olduğu tespit etmişlerdir (Yahia vd., 2005).

Felekoğlu vd. yaptıkları çalışmalarında, kireçtaşı katkısı kullanılarak üretilen beton numunelerin UK içeren numunelere göre erken yaş dayanımının daha fazla olduğunu, ancak 28. gün sonunda puzolanik reaksiyona giren UK içeren beton numunelerinin basıncı dayanımlarının daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir (Felekoğlu vd., 2006).

Zhu and Gibbs yaptıkları çalışmalarında, KYB'larda kalker tozunun sabit S/Ç oranıyla daha az kimyasal katkı kullanılmasına ve bunun da dayanımda artışa neden olduğu tespit etmişlerdir (Zhu and Gibbs, 2005).

Bonavetti vd., çalışmalarında %85'i kalsit olan karışımın, %20'sine kadar eklenen kireçtaşı'nın, hidrasyon sıcaklığına ve ürünlerine etkisini incelemişlerdir. Buna göre 0,25~0,50 aralığında değişen S/Ç oranıyla optimum imento-kireçtaşı değişimini araştırmışlardır. Sonuç olarak düşük S/Ç oranıyla karışımdaki kireçtaşı miktarının arttırılmasıyla hidrasyon ısısındaki artışın düşük olduğunu, ancak yüksek S/Ç oranında daha fazla hidrasyon ürünü hacmini tespit etmişlerdir. Diğer taraftan kireçtaşı katkılı betonların 28 günlük dayanımlarında bir miktar azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca düşük S/Ç oranına sahip ve %10~15 aralığında kireçtaşı

ilavesiyle yapılan betonların erken yaş basınç dayanımlarının etkilenmediğini ancak ileri yaş basınç dayanımlarında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Özetle, betondaki dayanım azalmasını önlemek için S/Ç oranında azalmaya gidilmesi gerektiğini vurgulamışlardır (Bonavetti vd., 1999).

Aruntaş vd., yapmış oldukları çalışmalarında, çimento üretiminde kullanılan kalker tozunun, tane boyutlarında çeşitlilik meydana getirmesiyle tanelerin daha sıkı birleştiğini ve bu durumun erken yaştaki beton dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir (Aruntaş vd., 2010).

#### **2.3.2.4. Kimyasal Katkılar**

Modern betonların bir diğer bileşeni de kimyasal katkılardır. Bunlar betonun özelliklerini iyileştirmek, maliyetini düşürmek, karıştırma ve kürleme sırasında ve olumsuz hava şartlarında bazı özelliklerini korumak amacıyla kullanılmaktadır. Kimyasal katkılar aynı zamanda düşük S/Ç oranı sağlayarak betonun dayanımının artmasında etkili olmaktadır. Bununla birlikte özellikle betonda yüksek dayanıma ulaşabilmek için süperakışkanlaştırıcı katkılar kullanılmaktadır. Bunlardan yüksek oranda su azaltıcı (süperakışkanlaştırıcı) katkıları TS EN 934-2 standardı madde 3.2.3'e göre belirli bir beton bileşiminde kıvamı değiştirmeden su miktarının yüksek oranda azalmasını sağlayan ve/veya su miktarı değişmeden çökmeyi/yayılmayı yüksek oranda artıran veya her iki etkiyi birlikte yaratan kimyasal malzemeler olarak tanımlanmıştır (TS EN 934-2+A1, 2013). Ayrıca yüksek oranda su azaltıcı katkıları su miktarını %12 kadar azaltabilmektedirler. Bu durumda betonda işlenebilirliğin ve dayanımın artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan son yıllarda naftalin, melamin ve linyosülfat içerikli süperakışkanlaştırıcı katkıların yanında polikarboksilat esaslı katkıları kullanılmaktadır. Süperakışkanlaştırıcılar çimento tanecikleri üzerinde birikerek ve tanecikleri aynı yükte yükleyerek bunların işlevlerini yerine getirmektedir. Ancak polikarboksilat esaslı katkıları, polikarboksilat polimerler benzer yüklerin birbirini itmesine ilave olarak sterik itki göstermektedirler (Sağlam vd., 2007). Polikarboksilat esaslı katkıları, beton karışımı içerisindeki su miktarının oldukça düşmesine neden olduğu için betonun yüksek dayanım kazandırmaktadırlar. Bunlar aynı zamanda yüksek segregasyon direnci ve işlenebilirlik sebep

olmaktadırlar. Böylece kalıp alma hızının artışıyla kaba inşaatın daha kısa sürede bitmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan yeni nesil akışkanlaştırıcı katkıları ayrışma direncini düşürdüğü için betonda ayrışma direncini artıracak mineral katkıların kullanılması gerekmektedir.



## BÖLÜM 3

### MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER

##### 3.1.1. Çimentolar

Yapılan bu tez çalışmasında, Bartın Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 PÇ'su ve Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen CAC kullanılmıştır (TS EN 197-1, 2012). Bu çimentolar 300 kg/m<sup>3</sup> ve 400 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere 2 farklı dozajda kullanılmıştır. Kullanılan çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.1. PÇ ve CAC'nin fiziksel analiz sonuçları.

| Deney Adı                          | PÇ                      |                   |                         | CAC                   |                                      |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
|                                    | Standart Limit Değerler | Ortalama Değerler | Analiz Metodu           | Ortalama Değerler (%) | Standart Minimum Limit Değerleri (%) |
| Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | -                       | 3,12              | Digital picnometer      | 3,25                  | -                                    |
| Hacim genleşmesi (Mm)              | ≤10                     | 1                 | TS EN 196-3             | 1                     | -                                    |
| Su/çimento oranı (%)               | -                       | 29                | TS EN 196-3             | 55                    | -                                    |
| Priz başlama süresi (dakika)       | ≥60                     | 205               | TS EN 196-3             | 280                   | 90                                   |
| Priz bitiş süresi (dakika)         | -                       | 265               | TS EN 196-3             | 295                   | -                                    |
| Blaine (cm <sup>2</sup> /gr)       | -                       | 3764              | Automatic Blaine device | 3000                  | -                                    |
| 45 µ elek (%)                      | -                       | 2                 | TS EN 196-6             | 23                    | -                                    |
| 90 µ elek (%)                      | -                       | 0,1               | TS EN 196-6             | 6,5                   | -                                    |
| Kıvam suyu                         | -                       | -                 | -                       | 23,1                  | -                                    |

Çizelge 3.2. PÇ ve CAC'nin kimyasal analiz sonuçları (TS EN 196-2, 2013).

| Deney Adı                      | PÇ                       |                       | CAC                   |                              |          |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|----------|
|                                | Standart Limit Değer (%) | Ortalama Değerler (%) | Ortalama Değerler (%) | Standart Limit Değerleri (%) |          |
|                                |                          |                       |                       | Minimum                      | Maksimum |
| Toplam SiO <sub>2</sub>        | -                        | 20,62                 | 3,60                  | -                            | -        |
| Çözünmeyen kalıntı             | ≤5                       | 0,34                  | -                     | -                            | -        |
| Çözünen SiO <sub>2</sub>       | -                        | 20,28                 | -                     | -                            | -        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                        | 5,17                  | 39,80                 | 35                           | 58       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                        | 4,17                  | 17,05                 | -                            | -        |
| CaO                            | -                        | 60,93                 | 36,20                 | -                            | -        |
| MgO                            | -                        | 2,20                  | 0,65                  | -                            | -        |
| SO <sub>2</sub>                | ≤4                       | 3,46                  | -                     | -                            | -        |
| Na <sub>2</sub> O              | -                        | 0,33                  | -                     | -                            | -        |
| K <sub>2</sub> O               | -                        | 0,73                  | -                     | -                            | -        |
| CL-                            | ≤0,1                     | 0,032                 | 0,0090                | -                            | 0,10     |
| Kızdırma kaybı                 | ≤5                       | 1,58                  | 0,30                  | -                            | -        |
| Na <sub>2</sub> O Eq.          | -                        | 0,81                  | -                     | -                            | -        |
| Na <sub>2</sub> Eq.            | -                        | -                     | 0,16                  | -                            | 0,40     |
| Serbest kireç                  | -                        | -                     | -                     | -                            | -        |
| SO <sub>3</sub>                | -                        | -                     | 0,04                  | -                            | 0,50     |
| S                              | -                        | -                     | 0,01                  | -                            | 0,10     |

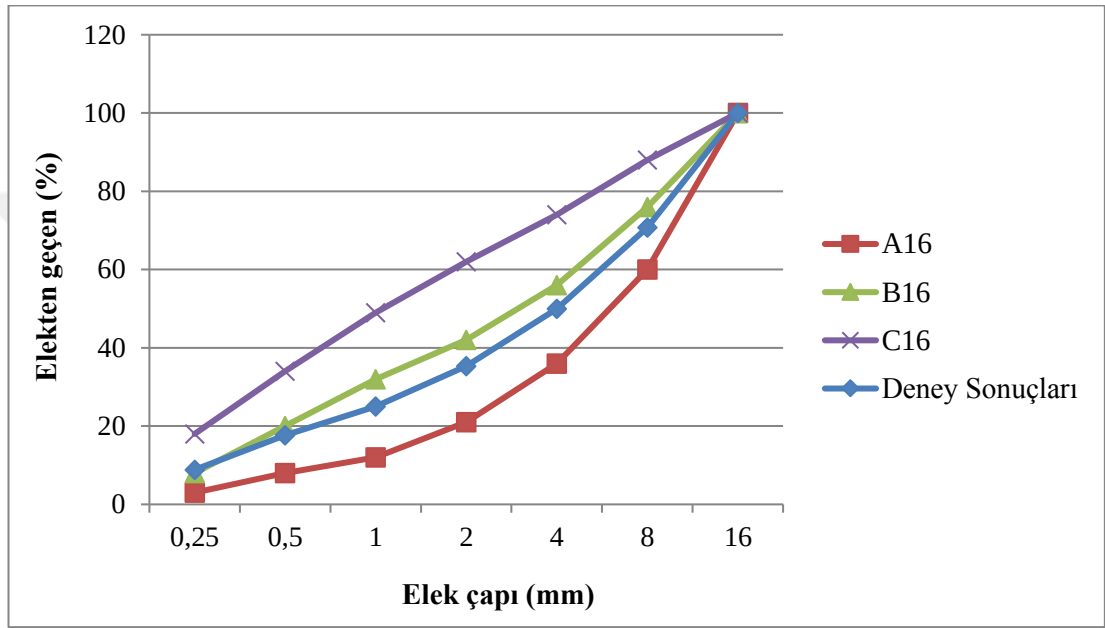
Çizelge 3.3. PÇ ve CAC'nin basınç dayanım sonuçları.

| Deney Adı                 | PÇ                            |                         | CAC                     |                                  |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                           | Standart Limit Değerler (MPa) | Ortalama Değerler (MPa) | Ortalama Değerler (MPa) | EN 197-1 Minimum Limit Değerleri |
| 6 saatlik basınç dayanımı | -                             | -                       | 47                      | 18                               |
| 1. gün                    | -                             | -                       | 70                      | 40                               |
| 2. gün                    | ≥20                           | 31,3                    | -                       | -                                |
| 7. gün                    | -                             | 41,2                    | -                       | -                                |
| 28. gün                   | 42,5~62,5                     | 54,2                    | -                       | -                                |

### 3.1.2. Agregalar

Gerçekleştirilen deneylerde, kırma taş iri agrega olarak ve kırma kum ince agrega olarak kullanılmıştır. En büyük agrega dane çapı ( $D_{maks}$ ) 16 mm'dir. Ayrıca tüm

deney serilerinde sabit oranla %50 ince (0~5 mm), %50 kalın agrega (5~16 mm) kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan tüm agregalar TS 706 EN 12620 standardına uygundur (TS 706 EN 12620+A1, 2009). Şekil 3.1’de görülen granülometri eğrisinde kullanılan agrega ideal granülometriye yakındır. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan agregaların granülometri eğrisi Şekil 3.1’de ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.1. Agrega karışımlarının granülometri eğrisi.

Çizelge 3.4. Kaba agregaların özgül ağırlığı ve absorpsiyonu.

| Kaba Agreganın Özgül Ağırlığı ve Absorpsiyonu (TS EN 1097-6) |                       |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                              | 12~22 mm Kırma Agrega |
| M1=Doygun ve havada kurutulmuş malzeme kütlesi gr.           | 480,9                 |
| M2=Kavanoz + Deney numunesi + Su kütlesi gr.                 | 1405,2                |
| M3=Kavanoz + Su kütlesi gr.                                  | 1104,8                |
| M4=Etüvde kurutulmuş deney numunesinin gr.                   | 477,1                 |
| $P_{ssd}=(M1/(M1-(M2-M3))$ : Doygun kuru yüzey tane yoğ.     | 2,66                  |
| $WA_{24}=(100*(M1-M4)) / M4$ : Su emme oranı                 | 0,80                  |

Çizelge 3.5. Orta agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu.

| <b>Orta Agreganın Özgül Ağırlığı ve Absorpsiyonu (TS EN 1097-6)</b> |                               |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
|                                                                     | <b>4~12 mm Kırma Agregası</b> |
| M1=Doygun ve havada kurutulmuş malzeme kütlesi gr.                  | 532,6                         |
| M2=Kavanoz + Deney numunesi + Su kütlesi gr.                        | 1437,1                        |
| M3=Kavanoz + Su kütlesi gr.                                         | 1104,8                        |
| M4=Etüvde kurutulmuş deney numunesinin gr.                          | 527,6                         |
| $P_{ssd}=(M1/(M1-(M2-M3))$ : Doygun kuru yüzey tane yoğ.            | 2,66                          |
| $WA_{24}=(100*(M1-M4)) / M4$ : Su emme oranı                        | 0,95                          |

Çizelge 3.6. İnce agreganın özgül ağırlığı ve absorpsiyonu.

| <b>İnce Agreganın Özgül Ağırlığı ve Absorpsiyonu (TS EN 1097-6)</b> |                         |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|                                                                     | <b>0~4 mm Kırma Kum</b> |
| M1=Doygun ve havada kurutulmuş malzeme kütlesi gr.                  | 221,6                   |
| M2=Kavanoz + Deney numunesi + Su kütlesi gr.                        | 811,9                   |
| M3=Kavanoz + Su kütlesi gr.                                         | 674                     |
| M4=Etüvde kurutulmuş deney numunesinin gr.                          | 217,9                   |
| $P_{ssd}=(M1/(M1-(M2-M3))$ : Doygun kuru yüzey tane yoğ.            | 2,65                    |
| $WA_{24}=(100*(M1-M4)) / M4$ : Su emme oranı                        | 1,70                    |

### 3.1.3. Mineral Katkılar

#### 3.1.3.1. Uçucu Kül

Deney numunelerinin üretiminde kullanılan UK Çatalağzı Termik Santralinden temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan UK'ün kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Çatalağzı UK'nün kimyasal analiz sonuçları (Türker vd., 2009).

| Numune                         |       |       |       |       |       |          |                |                       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------------|-----------------------|
| Oksit (%)                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | Ortalama | Standart Sapma | Varyasyon Katsayısı % |
| SiO <sub>2</sub>               | 58,69 | 58,48 | 58,55 | 58,95 | 59,07 | 58,75    | 0,25           | 0,43                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25,10 | 25,34 | 25,48 | 24,94 | 25,36 | 25,24    | 0,22           | 0,87                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,80  | 5,77  | 5,66  | 5,81  | 5,74  | 5,76     | 0,06           | 1,05                  |
| S+A+F                          | 89,59 | 89,59 | 89,69 | 89,70 | 90,17 | 89,75    | -              | -                     |
| CaO                            | 1,49  | 1,48  | 1,34  | 1,55  | 1,45  | 1,46     | 0,08           | 5,48                  |
| MgO                            | 2,22  | 2,22  | 2,22  | 2,22  | 2,20  | 2,22     | 0,01           | 0,45                  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,12  | 0,12  | 0,10  | 0,03  | 0,05  | 0,08     | 0,04           | 50                    |
| K <sub>2</sub> O               | 4,04  | 4,09  | 4,04  | 4,02  | 4,05  | 4,05     | 0,03           | 0,74                  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,59  | 0,59  | 0,59  | 0,61  | 0,61  | 0,60     | 0,01           | 1,83                  |
| KK                             | 1,28  | 1,01  | 1,33  | 1,02  | 0,98  | 1,12     | 0,17           | 15,18                 |
| Cl                             | 0,013 | 0,027 | 0,011 | 0,016 | 0,010 | 0,015    | 0,007          | 50                    |

Çizelge 3.8. Çatalağzı UK'nün kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi (Türker vd., 2009).

| Standartlara Uygunluk Sınırları |       |           |             |     |        |            |     |
|---------------------------------|-------|-----------|-------------|-----|--------|------------|-----|
| Oksit (%)                       | UK    | TS EN 450 | TS EN 197-1 |     | TS 639 | ASTM C 618 |     |
|                                 |       |           | V           | W   |        | F          | C   |
| SiO <sub>2</sub>                | 58,75 |           |             |     |        |            |     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 25,24 |           |             |     |        |            |     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 5,76  |           |             |     |        |            |     |
| S+A+F                           | 89,75 |           |             |     | >70    | >70        | >50 |
| CaO                             | 1,46  |           |             |     |        |            |     |
| MgO                             | 2,22  |           |             |     | <5     |            |     |
| SO <sub>3</sub>                 | 0,08  | <3        |             |     | <5     | <5         | <5  |
| K <sub>2</sub> O                | 4,05  |           |             |     |        |            |     |
| Na <sub>2</sub> O               | 0,60  |           |             |     |        |            |     |
| KK                              | 1,12  | <5        | <5          | <5  | <10    | <5         | <6  |
| Cl                              | 0,015 | <0,10     |             |     |        |            |     |
| Serb.CaO                        | 0,13  | <1        |             |     |        |            |     |
| Reak.SiO <sub>2</sub>           | 34,18 | >25       | >25         | >25 |        |            |     |
| Reak.CaO                        | 0,65  |           | <10         | >10 |        |            |     |

### 3.1.3.2. Silis Dumanı

Deney numunelerinde kullanılan SD Eti Elektrometalurji A.Ş.'den temin edilmiş ve tüm deney serilerinde %6 sabit oranında kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan SD'nın kimyasal özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. SD analiz sonuçları.

| SiFeCr Baca Tozuna Ait Analiz Sonuçları |          |
|-----------------------------------------|----------|
| % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 0,38     |
| % SiO <sub>2</sub>                      | 79,94    |
| % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 0,41     |
| % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 0,83     |
| % CaO                                   | 2,53     |
| % MgO                                   | 7,68     |
| % C                                     | 1,22     |
| % S                                     | 0,923    |
| % Kızdırma kaybı                        | 2,96     |
| <b>Elek Analizi (mm)</b>                | <b>%</b> |
| +0,250                                  | 0,18     |
| +0,125                                  | 0,73     |
| +0,074                                  | 0,57     |
| +0,044                                  | 1,14     |
| -0,044                                  | 97,38    |
| Yoğunluk– d (g/cm <sup>3</sup> )        | 0,199    |

### 3.1.3.3. Mikronize Kalsit

Deney numunelerinin üretiminde Niğtaş A.Ş.'den temin edilen mikronize kalsitler kullanılmıştır. Mikronize kalsitler; 10 ve 125 mikron olmak üzere iki farklı incelikte kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 10 mikron kalsitin özgül ağırlığı 2,79 gr/cm<sup>3</sup>, özgül yüzeyi 26615 cm<sup>2</sup>/gr ve 125 mikron kalsitin özgül ağırlığı 2,77 gr/cm<sup>3</sup>, özgül yüzeyi 2645 cm<sup>2</sup>/gr'dır.

### 3.1.4. Süperakışkanlaştırıcılar

Üretilen beton numunelerinde Fosroc İdea Yapı Kimyasalları firmasından temin edilen polikarboksilat esaslı Gantre 159 süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Gantre 159 süperakışkanlaştırıcı katkısının analiz sonuçları Çizelge 3.10'da verilmektedir.

Çizelge 3.10. Gantre 159 süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesinin analiz sonuçları.

|                                     | Ölçülen Değerler | Standart Değerler  | Analiz Yöntemi |
|-------------------------------------|------------------|--------------------|----------------|
| Homojenlik                          | Homojen          | Homojen            | Gözle          |
| Renk                                | Kahverengi       | Kahverengi         | Gözle          |
| Bağıl yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,08             | 1,06~1,10          | ISO 758        |
| pH                                  | 6,8              | 5,8~7,8            | ISO 4316       |
| Katı madde miktarı (%)              | 41,74            | 39,65~43,82        | EN 480-8       |
| Suda çözünebilen klorür (%)         | 0,05             | <0,1               | EN 480-10      |
| Alkali miktarı (%)                  | Uygun            | <5                 | EN 480-12      |
| FT-IR spectrum/etkin bileşen        | Uygun            | Referans Ir spect. | EN 480-6       |

### 3.1.5. Karışım Suyu

Beton numunelerinin üretiminde karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

## 3.2. BETON KARIŞIM HESABI

Yapılan deneysel çalışmalarda S/Ç oranı sabit olup 0,35 olarak seçilmiştir. Beton karışım hesabında KYB kriterleri dikkate alınarak toplam 600 kg bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında üretilen beton numunelerine ilişkin karışım hesapları Çizelge 3.11'de ve üretilen beton numunelerinin kodları ve açıklamaları da Çizelge 3.12'de verilmektedir.

Üretilen beton numuneleri serilerinde kullanılan SD miktarı %6 oranında sabittir. UK ise 400 kg çimento dozlu serilerde %19 ve 300 kg çimento dozlu serilerde ise

%35,67'dir. Ayrıca bu çalışmada, farklı miktarlarda kullanılan mikronize kalsit UK ile yerdeğiştirmiştir. Diğerk taraftan süperakışkanlaştırıcı miktarı maksimum %10'a kadar çıkarılmıştır.

Çizelge 3.11. Beton numunelerinin 1 m<sup>3</sup> için karışım hesabı.

| Kod   | Çimento türü | Çimento (kg) | Su (kg) | Kırma kum (kg) | Kırma taş (kg) | UK (kg) | SD (kg) | Kalsit boyutu (μ) | Kalsit miktarı (kg) | Katkı (%) |
|-------|--------------|--------------|---------|----------------|----------------|---------|---------|-------------------|---------------------|-----------|
| C4al  | CAC          | 400          | 140     | 827,2          | 827,2          | 114     | 36      | 125               | 50                  | 2,4       |
| C3al  | CAC          | 300          | 105     | 834            | 834            | 214     | 36      | 125               | 50                  | 7,55      |
| P4al  | CEM I        | 400          | 140     | 820            | 820            | 114     | 36      | 125               | 50                  | 2,3       |
| P3al  | CEM I        | 300          | 105     | 825,7          | 825,7          | 214     | 36      | 125               | 50                  | 8,3       |
| C4all | CAC          | 400          | 140     | 837,7          | 837,7          | 64      | 36      | 125               | 100                 | 2,3       |
| C3all | CAC          | 300          | 105     | 833,9          | 833,9          | 164     | 36      | 125               | 100                 | 9,75      |
| P4all | CEM I        | 400          | 140     | 827            | 827            | 64      | 36      | 125               | 100                 | 2,13      |
| P3all | CEM I        | 300          | 105     | 846,7          | 846,7          | 164     | 36      | 125               | 100                 | 9,02      |
| C4bl  | CAC          | 400          | 140     | 827,2          | 827,2          | 114     | 36      | 10                | 50                  | 2,4       |
| C3bl  | CAC          | 300          | 105     | 827,7          | 827,7          | 214     | 36      | 10                | 50                  | 9,38      |
| P4bl  | CEM I        | 400          | 140     | 819            | 819            | 114     | 36      | 10                | 50                  | 2,5       |
| P3bl  | CEM I        | 300          | 105     | 828,7          | 828,7          | 164     | 36      | 10                | 50                  | 7,46      |
| C4bll | CAC          | 400          | 140     | 835,2          | 835,2          | 64      | 36      | 10                | 100                 | 2,3       |
| C3bll | CAC          | 300          | 105     | 852,5          | 852,5          | 164     | 36      | 10                | 100                 | 10        |
| P4bll | CEM I        | 400          | 140     | 827            | 827            | 64      | 36      | 10                | 100                 | 3,02      |
| P3bll | CEM I        | 300          | 105     | 827,2          | 827,2          | 164     | 36      | 10                | 100                 | 10        |

Çizelge 3.12. Beton numunelerinin kodları ve açıklaması.

| Numune Kodlaması | Açıklaması                                     |
|------------------|------------------------------------------------|
| C4al             | 400 kg CAC, 50 kg 125 mikron mikronize kalsit  |
| C3al             | 300 kg CAC, 50 kg 125 mikron mikronize kalsit  |
| P4al             | 400 kg PC, 50 kg 125 mikron mikronize kalsit   |
| P3al             | 300 kg PC, 50 kg 125 mikron mikronize kalsit   |
| C4all            | 400 kg CAC, 100 kg 125 mikron mikronize kalsit |
| C3all            | 300 kg CAC, 100 kg 125 mikron mikronize kalsit |
| P4all            | 400 kg PC, 100 kg 125 mikron mikronize kalsit  |
| P3all            | 300 kg PC, 100 kg 125 mikron mikronize kalsit  |
| C4bl             | 400 kg CAC, 50 kg 10 mikron mikronize kalsit   |
| C3bl             | 300 kg CAC, 50 kg 10 mikron mikronize kalsit   |
| P4bl             | 400 kg PC, 50 kg 10 mikron mikronize kalsit    |
| P3bl             | 300 kg PC, 50 kg 10 mikron mikronize kalsit    |
| C4bll            | 400 kg CAC, 100 kg 10 mikron mikronize kalsit  |
| C3bll            | 300 kg CAC, 100 kg 10 mikron mikronize kalsit  |
| P4bll            | 400 kg PC, 100 kg 10 mikron mikronize kalsit   |
| P3bll            | 300 kg PC, 100 kg 10 mikron mikronize kalsit   |

### 3.3. BETON NUMUNELERİNİN ÜRETİMİ

Beton numunelerinin üretimine başlanmadan önce üretim yapılacak olan betoniye yıkanıp temizlenmiştir (bkz. Şekil 3.2). Betoniye kuruduktan sonra kırma-kum ve kırma taş konularak harmanlanmıştır. Daha sonra karışıma karma suyunun küçük bir kısmı eklenerek 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Betoniyerin karıştırma haznesinin içine bağlayıcı malzemeler (*çimento, mikronize kalsit, SD ve UK*) eklenmiştir. Bu şekilde karıştırma işlemi yapılırken karma suyunun tamamı karışıma ilave edilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı miktarları 1,5 dakikalık karıştırma süreleri boyunca ilave edilmiş ve 15 serinin deney süreleri 9 dakika içerisinde bitirilmiştir.



Şekil 3.2. Beton numunelerinin üretiminde kullanılan betoniyer.

Beton numuneleri serileri üretildikten sonra taze beton deneyleri kapsamında yayılma ve çökme deneyleri yapılmış, daha sonra önceden temizlenip yağlanmış 10x10x10 cm küp numune kalıplarına titreşime maruz bırakılmadan her bir seriden 10 adet doldurulmuştur. Üretilen seriler uygun sıcaklık ve nem koşullarında prizini tamamlayana kadar üzerleri örtülerek bekletilmiştir.



Şekil 3.3. Kalıplara doldurulan numunelerin durumu.

### 3.4. TAZE BETON DENEYLERİ

#### 3.4.1. Yayılma Deneyi

Beton karışımlarının yayılma deneyleri TS EN 12350-5 standardına uygun şekilde yapılmıştır (TS EN 12350-5, 2010). Buna göre üretimi yapılan beton numuneleri serileri betoniyerden alınarak 100x100 cm levha üzerinde ters şekilde konumlandırılmış Abrams konisine doldurulmuştur. Üretilen akıcı betonlar kısa süre içinde huniye yerleşmiş ve üst kısmı tesviye edilmiştir. Bu işlemden kısa süre sonra Abrams konisi sarsmadan yavaşça yukarı kaldırılmış ve betonun yayılma sonu çapları ölçülmüştür. Yayılma işlemi bittikten sonra en büyük çap ve ona dik çap ölçülmüş ve üretilen serilerin yayılma sınıfları belirlenmiştir (bkz. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Serilerin TSE EN 206-1 standardına göre F5-F6 yayılma sınıfları aralığında olduğu tespit edilmiştir (TSE EN 206-1, 2002).



Şekil 3.4. Betoniyer içindeki karışım durumu.



Şekil 3.5. Beton numunelerinin yayılma deneyleri.

### 3.4.2. Çökme Deneyi

Beton numunelerinin çökme deneyi için üst çapı 10 cm, alt taban çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan çökme (Abrams) hunisi metal tepsinin içine yerleştirilmiştir. Çökme hunisinin üçte biri üretilen beton karışımıyla doldurulmuş ve 61 cm uzunluğundaki Ø 16 çubukla 25 defa şişlenmiştir. Daha sonra huninin üçte ikilik kısmı doldurulmuş ve tekrar 25 defa şişleme işlemi yapılmıştır. Son olarak çökme hunisi tamamen doldurulmuş ve 25 defa şişlenmiştir. Huni üzerinde kalan fazla beton malayla temizlenmiş ve huni 5~10 saniye içerisinde sabit hızla düz bir şekilde çekilmiştir. Huni yığılan betonun yanına konularak üzerine betonun üzerine de gelecek şekilde şişleme çubuğu konulmuştur. Betonun üst değeri ve çubuğun alt yüzeyi arasındaki mesafe betonun çökme sınıfını belirlemektedir. Üretilen beton numuneleri serilerinden sadece P3bll çökme deneyi yapılmıştır (bkz. Şekil 3.6). Söz konusu numunenin çökme deneyi TS EN 12350-2 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir (TS EN 12350-2, 2019).



Şekil 3.6. P3bll beton serisi çökme deneyi.

300 kg CAC ve 10 mikron 100 kg kalsit içeren bu beton karışımına %10 oranında polikarboksilat esaslı katkı malzemesi katılmıştır. Söz konusu karışımın görünümü Şekil 3.7'deki gibi oluşmuştur. Sonuç olarak %10'un üzerinde katkı malzemesi kullanımının uygulanabilir olmadığı görülmüş ve beton üretimi yapılamamıştır.



Şekil 3.7. Üretilmeyen C3bll beton serisi.

#### 3.4.3. Kür Programı

Basınç deneylerine tabi tutulacak tüm beton numuneleri kirece doygun suda, 20°C sabit sıcaklıkta ve %100 nem koşuluna sahip kür odasında muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.8. Beton numunelerinin muhafaza edildiği kür havuzundan bir görünüm.

### 3.5. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ

#### 3.5.1. Basınç Dayanımı

Beton numunelerinin basınç dayanımı deneyleri 100x100x100 mm küp numunelerle yapılmıştır (bkz. Şekil 3.9). Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan cihaz 2000 kN kapasiteye sahip olup, söz konusu numunelerin deneyleri TS EN 12390-3 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Üretilen beton numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları bu standarda göre belirlenmiştir. Söz konusu standarda göre üretilen beton numunelerin basınç dayanımları;

$$F_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

Bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda  $F_c$  betonun basınç dayanımını (N/mm<sup>2</sup>),  $F$  kırılma anındaki ulaşılan en büyük yükü (N) ve  $A_c$  beton numunesinin üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanını (mm<sup>2</sup>) göstermektedir.



Şekil 3.9. P4al serisinin basınç dayanım deneyinden bir görünüm.

## BÖLÜM 4

### DENEY SONUÇLARINDAN ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

#### 4.1. TAZE BETON DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde Bölüm 3'te verilen deneysel çalışmalara ilişkin 15 farklı kendiliğinden yerleşen taze betonların deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Akıcı taze betonların deney sonuçları.

| Karışım | Yayılma<br>( $D_{maks}$ ) | Yayılma<br>Sınıfı | Çökme<br>Değeri | Çökme<br>Sınıfı | Katkı<br>Dozajı |
|---------|---------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| C4al    | 65 cm                     | F6                | -               | -               | 2,4             |
| C3al    | 55 cm                     | F4                | -               | -               | 7,55            |
| P4al    | 55 cm                     | F4                | -               | -               | 2,3             |
| P3al    | 56 cm                     | F5                | -               | -               | 8,3             |
| C4all   | 65 cm                     | F6                | -               | -               | 2,3             |
| C3all   | 65 cm                     | F6                | -               | -               | 9,75            |
| P4all   | 65 cm                     | F6                | -               | -               | 2,13            |
| P3all   | 64 cm                     | F6                | -               | -               | 9,02            |
| C4bl    | 60 cm                     | F5                | -               | -               | 2,4             |
| C3bl    | 65 cm                     | F6                | -               | -               | 9,38            |
| P4bl    | 54 cm                     | F4                | -               | -               | 2,5             |
| P3bl    | 55 cm                     | F4                | -               | -               | 7,46            |
| C4bll   | 56 cm                     | F5                | -               | -               | 2,3             |
| P4bll   | -                         | -                 | 23 cm           | S5              | 3,02            |
| P3bll   | 59 cm                     | F5                | -               | -               | 10              |

Hedeflenen yayılma değeri minimum 54 cm olup, gerçekleştirilen tüm deneyler sonucunda bu tez çalışmasında hedeflenen yayılma değerine ulaşılmıştır.

#### 4.2. SERTLEŞMİŞ BETON DENEY SONUÇLARI

Üretilen 15 seri beton numunesinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Bu amaçla her seriden ikişer adet numune kırılmıştır. Deneyler sonucunda tüm beton serilerinin elde edilen basınç dayanım değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 15 seri beton numunesinin 3, 7, 28 ve 90 günlük deney sonucu elde edilen basınç dayanımını değerleri.

| Numune Kodları | Adet (n) | 3 gün, Mpa (Ortalama) | 7 gün, Mpa (Ortalama) | 28 gün, Mpa (Ortalama) | 90 gün Mpa (Ortalama) | 90 gün Etüv |
|----------------|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------------|
| C4al           | 2        | 54,62                 | 60,98                 | 63,70                  | 73,74                 | 54,30       |
| C3al           | 2        | 49                    | 51,45                 | 57,75                  | 63,80                 | 56,2        |
| P4al           | 2        | 61,62                 | 71,58                 | 85,97                  | 98,58                 | 108,50      |
| P3al           | 2        | 55                    | 66,66                 | 80,20                  | 90,70                 | 85,6        |
| C4all          | 2        | 56                    | 61,60                 | 79,16                  | 81,20                 | 46,05       |
| C3all          | 2        | 51,31                 | 55,97                 | 59,60                  | 64,05                 | 74,8        |
| P4all          | 2        | 52                    | 57,26                 | 72,17                  | 93,59                 | 65,40       |
| P3all          | 2        | 44,56                 | 57,65                 | 65,25                  | 78,75                 | 89          |
| C4bl           | 2        | 71,13                 | 76,23                 | 81,65                  | 90                    | 59          |
| C3bl           | 2        | 67,36                 | 73,58                 | 78,58                  | 85                    | 55,20       |
| P4bl           | 2        | 39                    | 53,70                 | 79,22                  | 88,05                 | 91,05       |
| P3bl           | 2        | 35,04                 | 48,33                 | 60,20                  | 79,10                 | 73,7        |
| C4bll          | 2        | 71,41                 | 75,21                 | 76,63                  | 87                    | 62,20       |
| C3bll          | 2        | -                     | -                     | -                      | -                     | -           |
| P4bll          | 2        | 37,04                 | 55,30                 | 70,85                  | 84,90                 | 85,2        |
| P3bll          | 2        | 34,91                 | 48,70                 | 68,05                  | 69,15                 | 63,3        |

Bu çizelgeden;

- 1) Bu tez çalışması kapsamında üretilen yüksek dayanımlı akıcı betonlar içinde erken dayanımı en yüksek olan beton serisi  $400 \text{ kg/m}^3$  dozajlı, CAC ve 10 mikron kalsitle üretilmiş numunedir. Bunun nedeninin çalışma kapsamında iki farklı incelikte kullanılan kalsitin etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü 10 mikron kalsit yüzey alanı diğerine göre 10 kat fazla olduğu düşünülürse dolgu etkisinin artmasıyla erken dayanımların da en yüksek seviyede olması normal bir durum olmaktadır. Ayrıca CAC'nun erken dayanımlarının PÇ'sundan daha yüksek olmaktadır.
- 2) Üretilen beton numuneleri arasında erken dayanımı en düşük olan numune serisi PÇ ile üretilmiş olan P3bl serisidir. Bu beton serisi  $300 \text{ kg/m}^3$  PÇ ve 100 kg 10 mikron kalsit içermektedir.
- 3) 7 günlük basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek dayanımın  $400 \text{ kg/m}^3$  CAC'li ve 10 mikron boyutlu kalsit içeren beton serisinde (C4bl) olduğu görülmüştür. Diğer taraftan 7 günlük en düşük dayanıma sahip beton (P3bl serisi)  $300 \text{ kg/m}^3$  PÇ ve 10 mikron kalsit içermektedir. 3 ve 7 günlük dayanım değerlerinin düşük olması, PÇ'nin erken dayanımının düşük olması ile açıklanabilmektedir.
- 4) Üretilen serilerinin 28 günlük basınç dayanımlarına bakıldığında ise en yüksek dayanıma sahip olan beton serisinin 85,97 MPa basınç dayanımına sahip olan P4al serisi olduğu görülmektedir. Bu beton serisi  $400 \text{ kg/m}^3$  PÇ ve 125 mikron kalsit içermektedir. Bu durum PÇ'nin nihai dayanıma olan katkısının yanında, SD ve UK katkılarının da söz konusu betonların 28 günlük basınç dayanımlarına olan katkılarıyla açıklanabilmektedir.
- 5) Gerçekleştirilen deneyler sonucunda 28 günlük numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında, en düşük dayanıma sahip beton serisinin 57,75 MPa basınç dayanımına sahip C3al serisi olduğu görülmüştür. Bu C3al beton serisi  $300 \text{ kg/m}^3$  dozajlı CAC ve 125 mikron kalsit içermektedir. CAC'li beton serileri incelendiğinde bunlarda dayanım artışının zamanla azaldığı görülmüştür.

6) Beton serilerinin 90 günlük nihai dayanımları incelendiğinde PÇ'deki artışın CAC'ye göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 90 günlük dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımının P4al beton serisinde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan üretilen beton numuneleri içerisinde ulaşılan en yüksek basınç dayanımı değeri 98,58 MPa'dır. Üretilmiş yüksek dayanımlı beton numunesi 400 kg/m<sup>3</sup> PÇ ve 125 mikron kalsit içermektedir. Ayrıca UK ve SD'nin nihai dayanımlara olan etkisi, PÇ'sunda daha etkin bir şekilde görülmektedir.

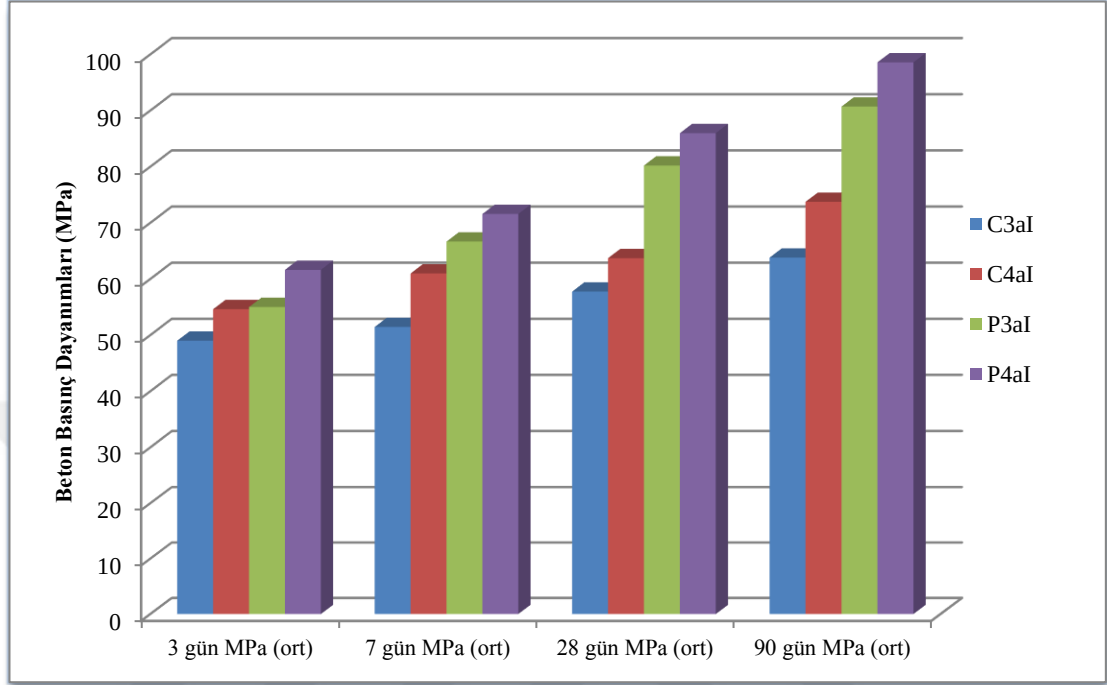
7) Deneyler kapsamında nihai dayanımı en düşük olan beton serisi C3al numunesidir. Bu numune 300 kg/m<sup>3</sup> dozajlı CAC ve 125 mikron kalsit içermekte, söz konusu beton serisinin 90 günlük dayanımı 63,80 MPa'dır.

8) Deneyler sonucunda CAC'lar arasında 90 günlük dayanımlara bakıldığında C4bl numune serisinin 90 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. Bu durumun kalsitin erken dayanıma olan katkısının yanında, nihai dayanımı düşük olduğu bilinen CAC'nun, 90 MPa basınç dayanımına ulaşmasında SD ve UK katkılarının etkisiyle olduğu düşünülmektedir.

9) Deneysel çalışmalar kapsamında 90. günün sonunda numuneler 100 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde bekletilmiştir. Daha sonra etüvden çıkarılan beton numunelerinin basınç dayanımları tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda CAC içeren YDB'ların basınç dayanımlarında azalma gözlemlenmiş buna karşın PÇ kullanılan numunelerin basınç dayanımlarında ise artış görülmüştür.

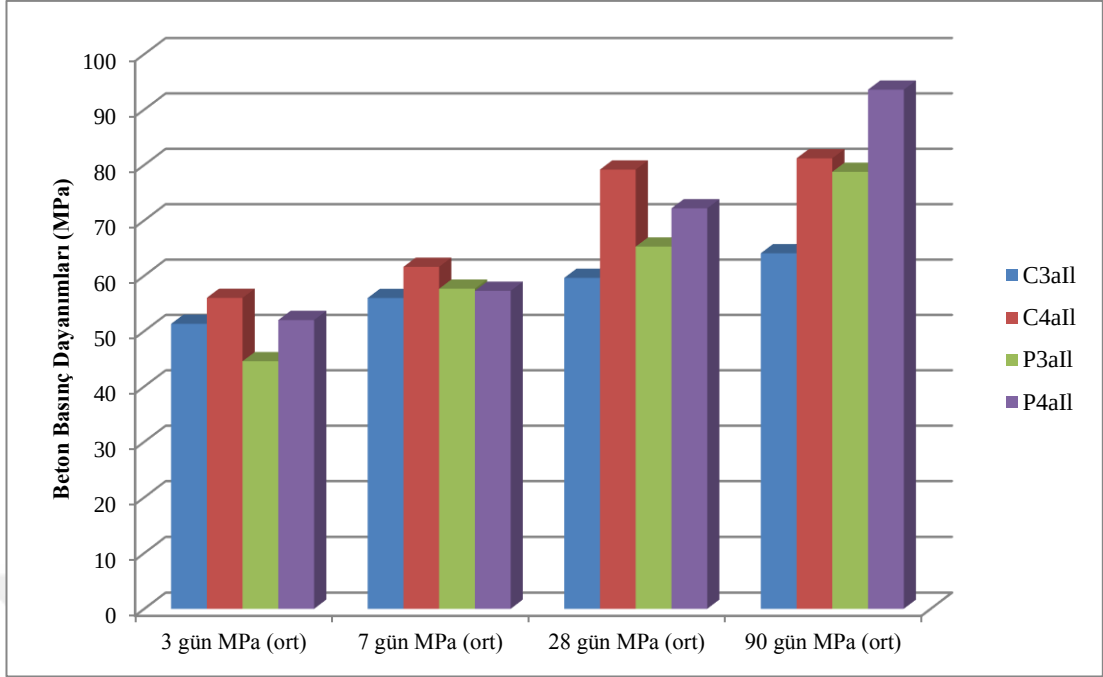
125 mikron 50 kg mikronize kalsit içeren karışımların çimento dozajıyla basınç dayanımlarının değişimi Şekil 4.1'de verilmektedir. Bu şekilden karışımlardaki çimento miktarının artmasıyla CAC'da %10 dayanım artışının olduğu görülmektedir. Ancak PÇ ile üretilen beton numunelerinde bu oran %10'lara ulaşmamıştır. Ayrıca bütün deney serilerinde PÇ ile elde edilen beton numunelerinin basınç dayanımlarının CAC'den fazla olduğu görülmüştür. Diğer taraftan erken dayanımlardaki PÇ ve CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları birbirine yakın iken geç dayanımlarda PÇ ve CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları arasındaki fark artmaktadır. Ayrıca bu şekilden CAC ile üretilen beton

numunelerinin erken dayanımı ve geç dayanımı arasındaki farkın, PÇ ile üretilenlerle kıyaslandığında, çok fazla olmadığı görülmektedir.



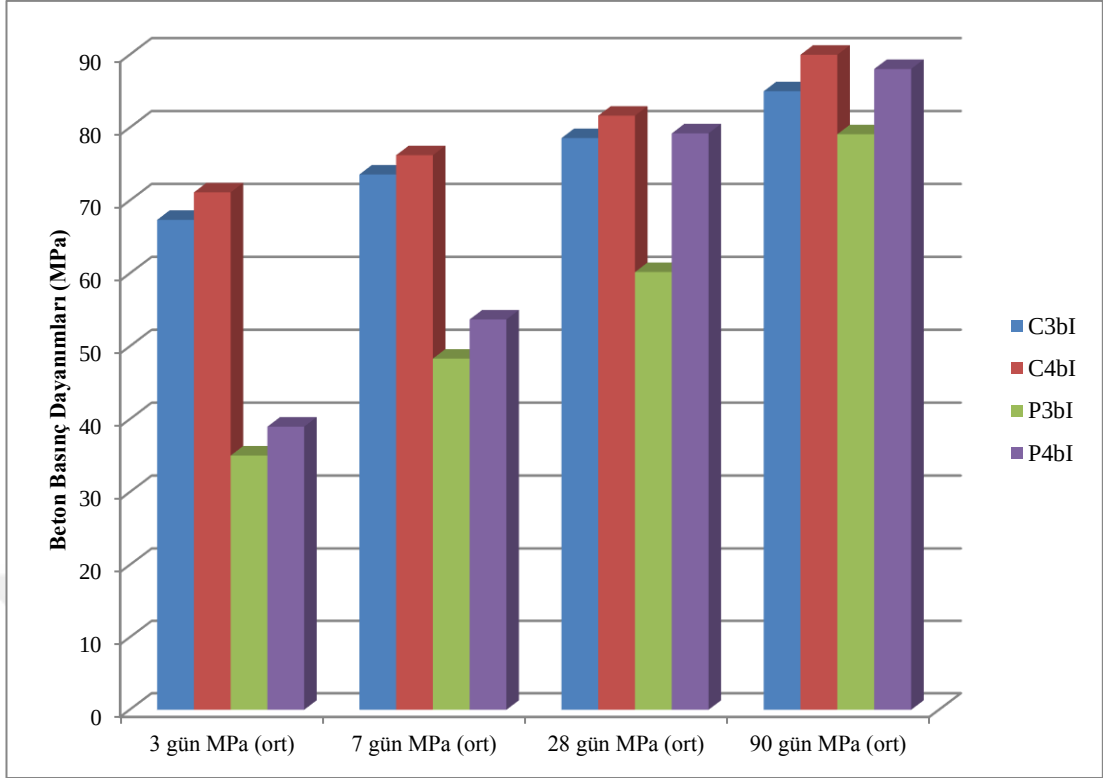
Şekil 4.1. 125 mikron, 50 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları.

125 mikron 100 kg mikronize kalsit içeren karışımların çimento dozajı ile basınç dayanımlarının değişimi Şekil 4.2’de verilmektedir. Bu şekilden karışımlardaki çimento miktarının artmasıyla CAC’de 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarında önemli oranda artış gözlemlenmemesine karşın 28 günlük basınç dayanımlarında %33 ve 90 günlük basınç dayanımlarında ise %27 dayanım artışının olduğu görülmektedir. Ancak PÇ ile üretilen beton numunelerinde ise bu oran 90 günlük basınç dayanımında %18 kadar olmaktadır. Ayrıca erken dayanımlarda PÇ ve CAC’den elde edilen beton basınç dayanımları birbirine yakın iken geç dayanımlarda PÇ ve CAC’den elde edilen beton basınç dayanımları arasındaki fark artmaktadır.



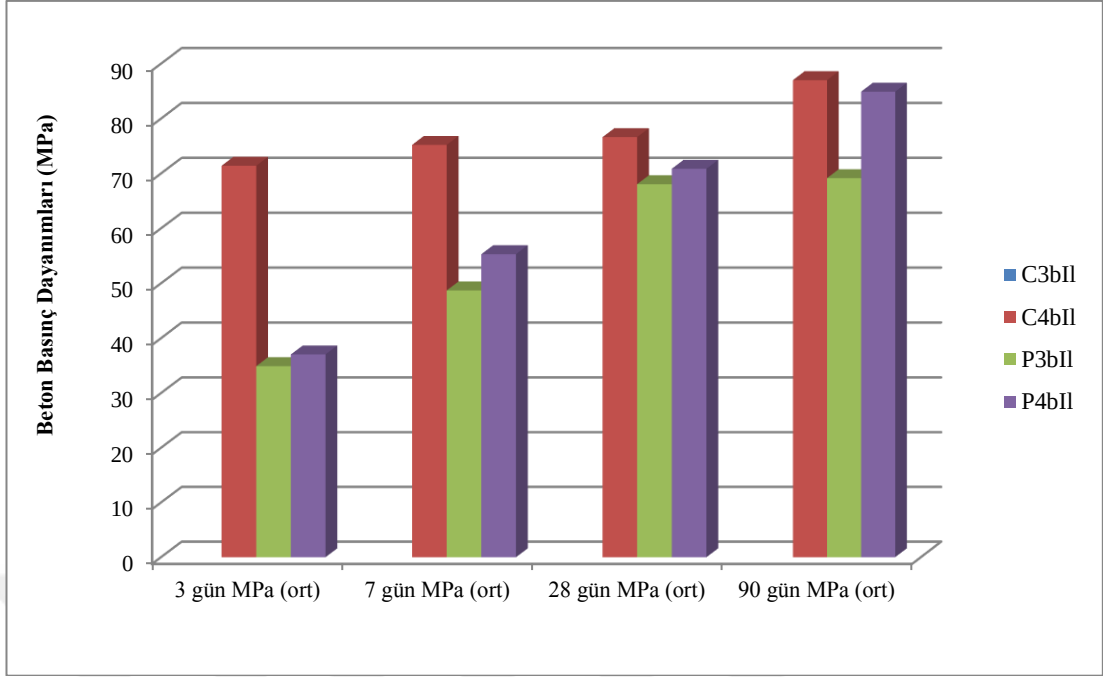
Şekil 4.2. 125 mikron, 100 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları.

10 mikron 50 kg mikronize kalsit içeren karışımların çimento dozajıyla basınç dayanımlarının değişimi Şekil 4.3'te verilmektedir. Bu şekilden karışımlardaki çimento dozajının artmasıyla CAC'da 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında önemli oranda (%5~10) bir artış olmadığı, ancak PÇ içeren karışımlarda 28 günlük basınç dayanımlarında %31 oranında dayanım artışının olduğu görülmektedir. Diğer taraftan erken dayanımlarda CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları PÇ ile elde edilenlerin hemen hemen 2 katı kadar iken geç dayanımlarda PÇ ve CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır. Ayrıca bütün deney serilerinde CAC ile elde edilen beton numunelerinin basınç dayanımlarının PÇ'den fazla olduğu görülmektedir.



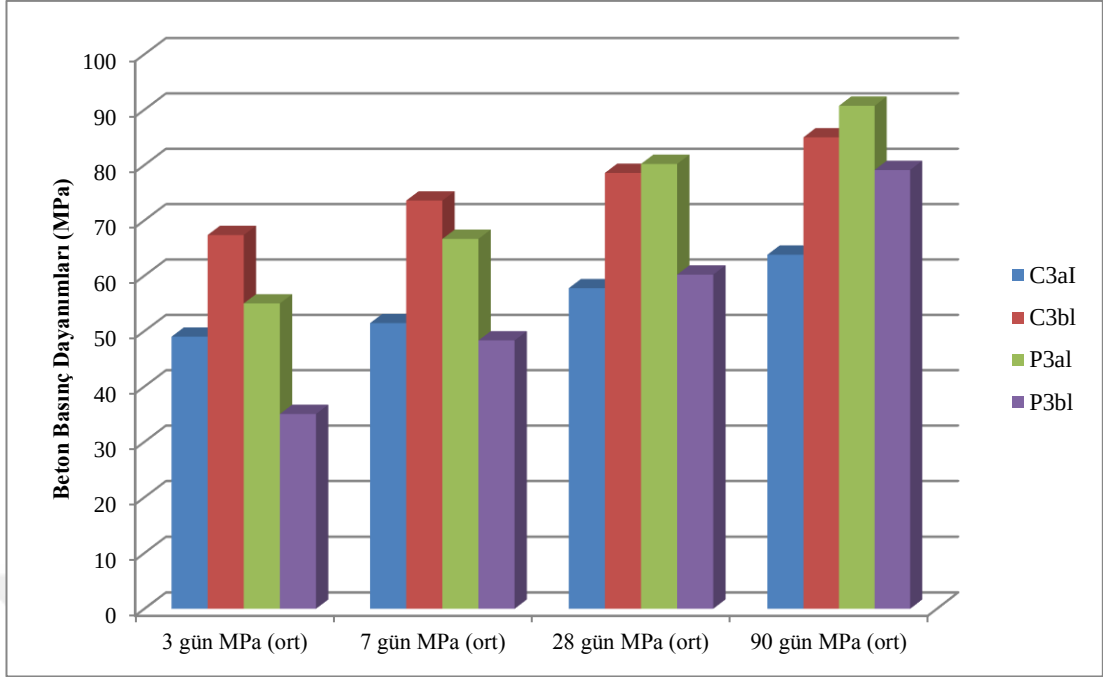
Şekil 4.3. 10 mikron, 50 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları.

10 mikron 100 kg mikronize kalsit içeren karışımların çimento dozajıyla basınç dayanımlarının değişimi Şekil 4.4'te verilmektedir. Bu şekilde C3bll serisi üretilmediği için çimento dozajının basınç dayanımına etkisi kıyaslanamamıştır. Ayrıca bu şekilden karışımlardaki çimento dozajının artmasıyla C4bll serisinde erken dayanımlarda basınç dayanımlarının PÇ ile elde edilenlerin hemen hemen 2 katı kadar iken geç dayanımlarda C4bll ve PÇ'den elde edilen beton basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır. Diğer taraftan erken dayanımlarda PÇ serileri çimento dozajıyla düşük basınç dayanımı değerleri verirken geç dayanımlarda ise yüksek basınç dayanımı değerleri vermektedirler. Ayrıca 3, 7 ve 28 günlük PÇ serilerinin basınç dayanımlarında önemli oranda artış olmadığı, ancak 90 günlük basınç dayanımlarında %22'lik artışın olduğu gözlemlenmektedir. Bu şekildeki seriler dikkate alındığında en yüksek basınç dayanımının C4bll serisinde olduğu görülmektedir.



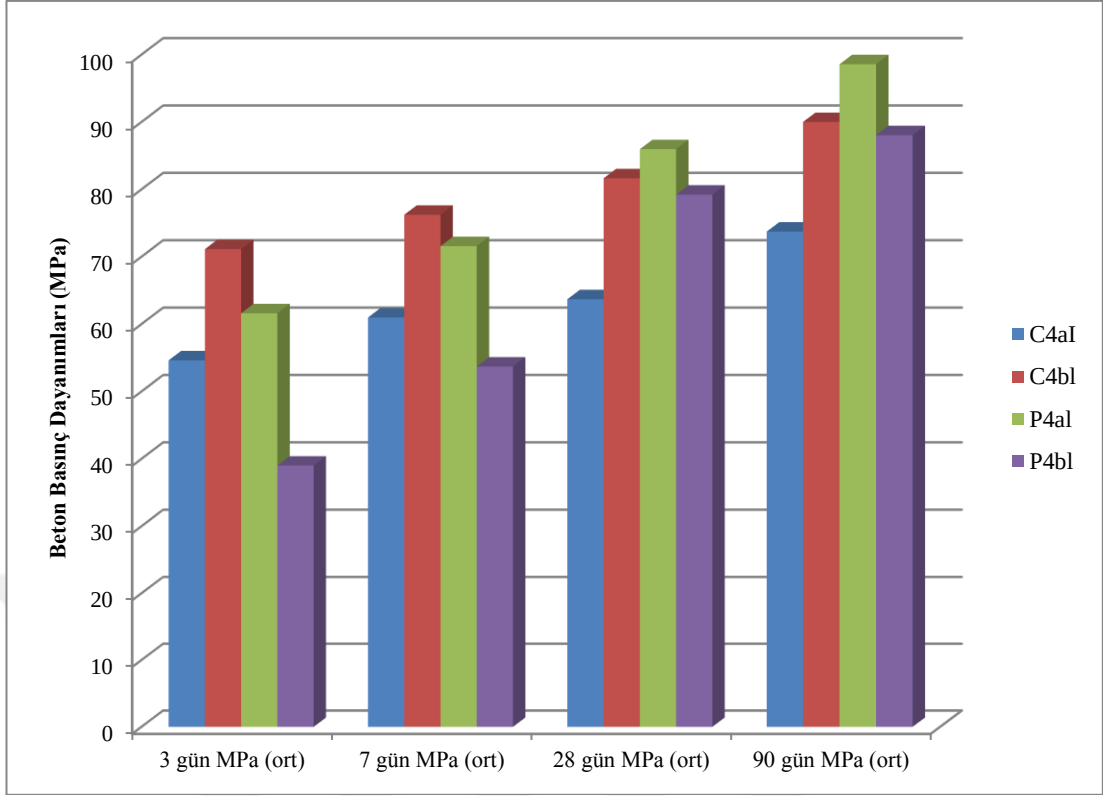
Şekil 4.4. 10 mikron, 100 kg mikronize kalsit katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları.

300 kg çimento dozajıyla 50 kg mikronize kalsit içeren karışımlarda kalsit inceliğinin (10 ve 125 mikron) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.5'te verilmektedir. Bu şekilden 10 mikron CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları 125 mikrondan elde daha büyük buna karşın 125 mikron PÇ'den elde edilen beton basınç dayanımları 10 mikrondan elde edilenlerden büyük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle CAC'da kalsit inceliğinin küçük olduğu ve PÇ'de ise kalsit inceliğinin büyük olduğu durumlarda daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Diğer taraftan erken dayanımlarda kalsit inceliğinin azalmasıyla CAC'lerden üretilen numunelerin basınç dayanımları yüksek buna karşın PÇ'lerden üretilen numunelerin basınç dayanımları ise düşük olmaktadır. Özetle kalsit inceliğinin azalmasıyla CAC içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %37, 7. günde %43, 28. günde %36 ve 90. günde %33 dayanım artışı olduğu buna karşın PÇ içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %36, 7. günde %27, 28. günde %24 ve 90. günde %12 azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca bütün deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 125 mikron kalsit inceliğine sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P3al) olduğu görülmektedir.



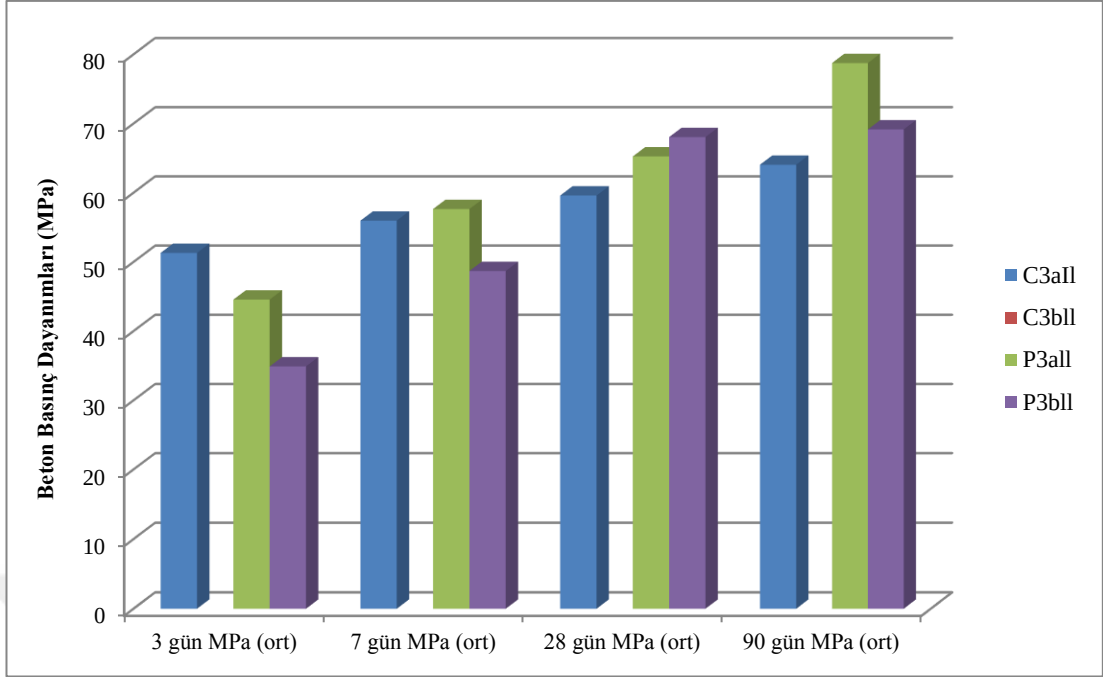
Şekil 4.5. 300 kg çimento ve 50 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

400 kg çimento dozajıyla 50 kg mikronize kalsit içeren karışımlarda kalsit inceliğinin basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.6'da verilmektedir. Bu şekilden 10 mikron CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları 125 mikrondan elde daha büyük olmasına buna karşın 10 mikron PÇ'den elde edilen beton basınç dayanımları 125 mikrondan elde edilenlerden küçük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle CAC'da kalsit inceliğinin küçük olduğu ve PÇ'de ise kalsit inceliğinin büyük olduğu durumlarda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Diğer taraftan erken dayanımlarda kalsit inceliğinin azalmasıyla CAC'lerden üretilen numunelerin basınç dayanımları büyük buna karşın PÇ'lerden üretilen numunelerin basınç dayanımları ise küçük olmaktadır. Özetle kalsit inceliğinin azalmasıyla CAC içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %30, 7. günde %25, 28. günde %28 ve 90. günde %22 dayanım artışı olduğu buna karşın PÇ içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %36, 7. günde %24, 28. günde %27,8 ve 90. günde %10 azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca bu şekilde dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 125 mikron kalsit inceliğine sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P4aI) olduğu görülmektedir.



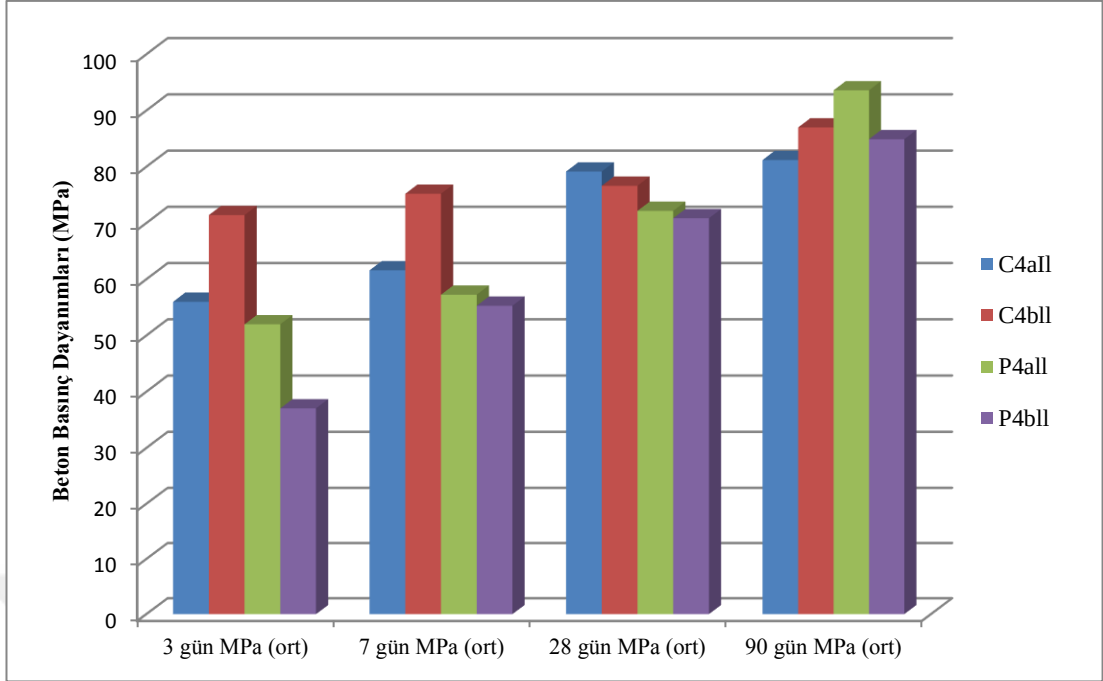
Şekil 4.6. 400 kg çimento ve 50 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

300 kg çimento dozajıyla 100 kg mikronize kalsit içeren karışımlarda kalsit inceliğinin (10 ve 125 mikron) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.7’de verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi C3bII serisi üretilmediği için 100 kg mikronize kalsit içeren karışımlarda kalsit inceliğinin söz konusu numunelerin basınç dayanımına etkisi kıyaslanamamıştır. Bu şekilden 125 mikron PÇ’den elde edilen beton basınç dayanımları 10 mikrondan elde edilenlerden büyük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan erken dayanımlarda kalsit inceliğinin azalmasıyla PÇ’lerden üretilen numunelerin basınç dayanımları düşük olmaktadır. Özetle kalsit inceliğinin azalmasıyla PÇ içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %21, 7. günde %15 ve 90. günde %12 azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca bütün deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 125 mikron kalsit inceliğine sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P3aII) olduğu görülmektedir.



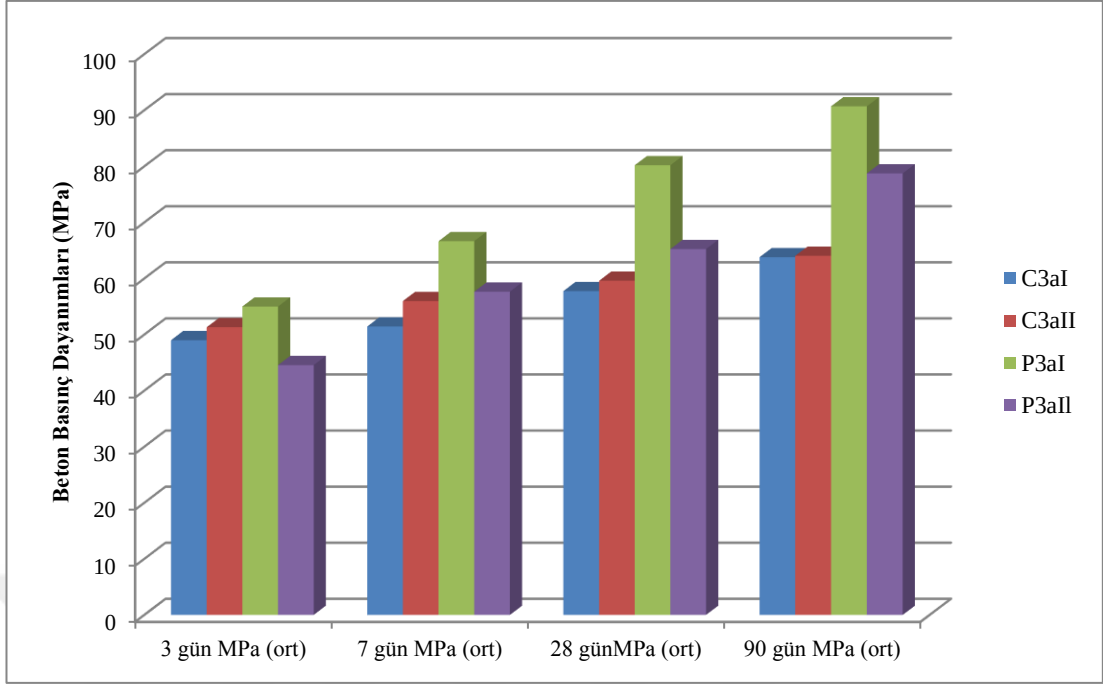
Şekil 4.7. 300 kg çimento ve 100 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

400 kg çimento dozajıyla 100 kg mikronize kalsit içeren karışımlarda kalsit inceliğinin (10 ve 125 mikron) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.8’de verilmektedir. Bu şekilden 10 mikron CAC’den elde edilen beton basınç dayanımları 125 mikrondan elde daha büyük olmasına buna karşın 10 mikron PÇ’den elde edilen beton basınç dayanımları 125 mikrondan elde edilenlerden küçük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle CAC’da kalsit inceliğinin küçük olduğu ve PÇ’de ise kalsit inceliğinin büyük olduğu durumlarda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Özetle kalsit inceliğinin azalmasıyla CAC içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %27, 7. günde %22 ve 90. günde %7 dayanım artışı olduğu buna karşın PÇ içeren karışımların basınç dayanımlarında 3. günde %28, 7. günde %3, 28. günde %1 ve 90. günde %9 azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca bu şekilde dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 125 mikron kalsit inceliğine sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P4all) olduğu görülmektedir.



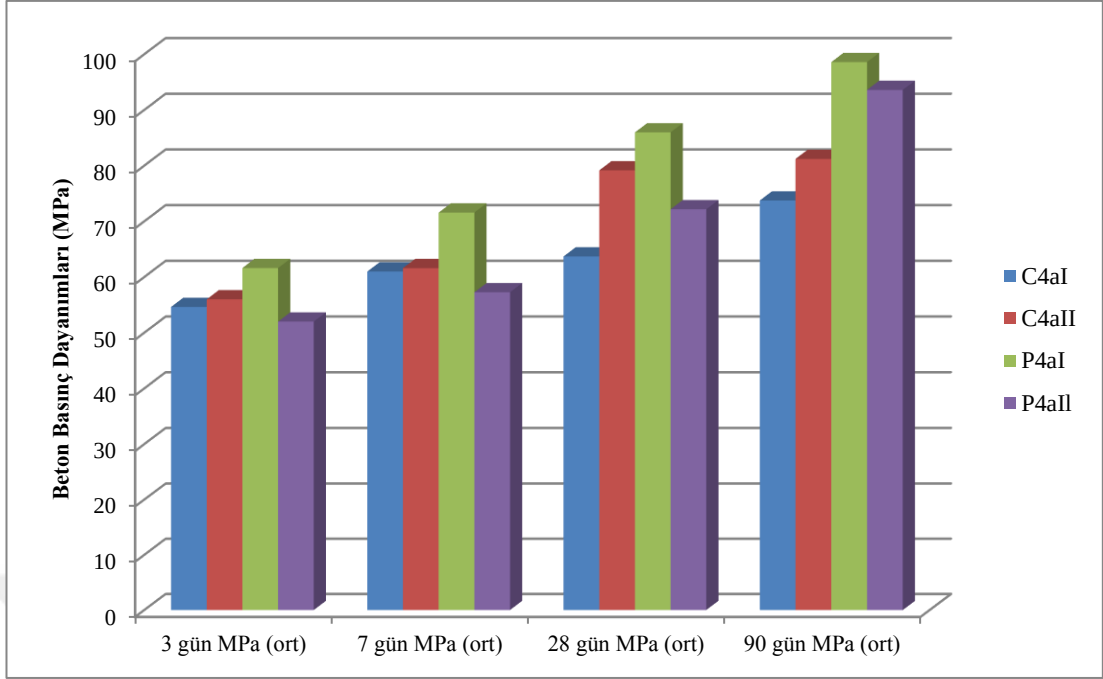
Şekil 4.8. 400 kg çimento ve 100 kg mikronize kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

300 kg çimento dozajıyla 125 mikron kalsit içeren karışımlarda kalsit miktarının (50 ve 100 kg) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.9’da verilmektedir. Bu şekilden 50 kg kalsit ve CAC içeren karışımlardan elde edilen beton basınç dayanımlarının 100 kg kalsit içeren karışımlardan elde daha küçük olmasına buna karşın 50 kg kalsit ve PÇ içeren karışımlardan elde edilen beton basınç dayanımlarının 100 kg kalsit içeren karışımlardan elde edilenlerden büyük olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle CAC’da kalsit miktarının fazla olduğu ve PÇ’de ise kalsit miktarının az olduğu durumlarda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Özetle kalsit miktarının artmasıyla CAC içeren karışımların basınç dayanımlarında %5~10 dayanım artışı olduğu buna karşın PÇ içeren karışımların basınç dayanımlarında %18 azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca bu şekilde dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 125 mikron ve 50 kg kalsit miktarına sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P3aI) olduğu görülmektedir.



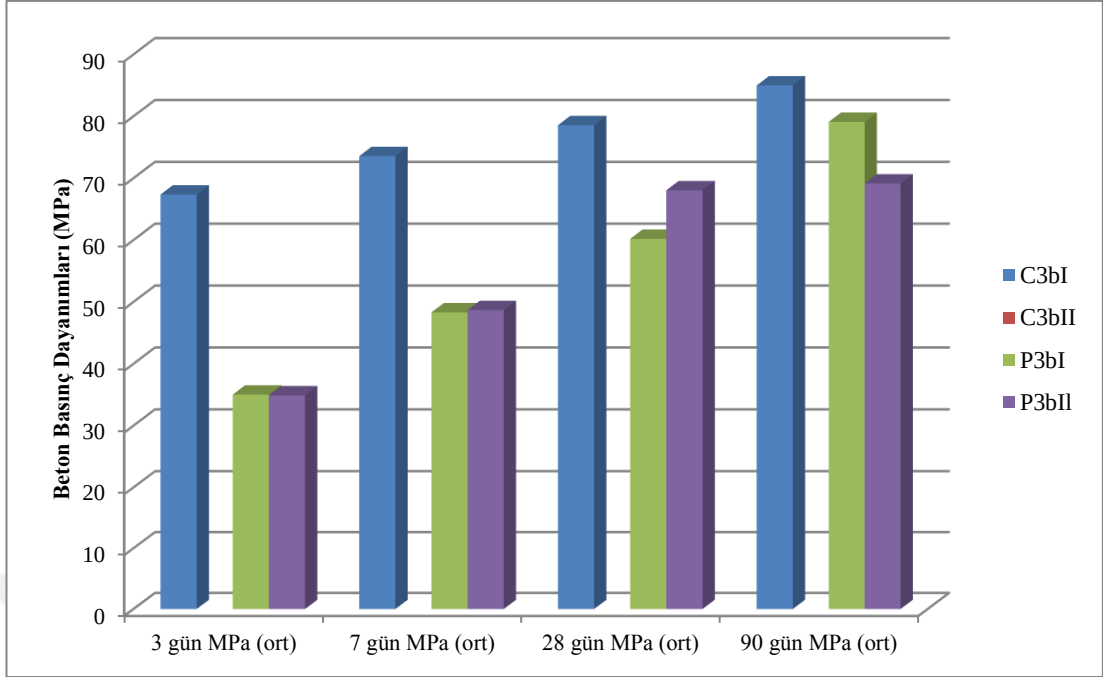
Şekil 4.9. 300 kg çimento ve 125 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

400 kg çimento dozajıyla 125 mikron kalsit içeren karışımlarda kalsit miktarının (50 ve 100 kg) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.10'da verilmektedir. Bu şekilden 50 kg kalsit ve CAC içeren karışımlarda erken dayanımlarda kalsit miktarının artmasıyla önemli dayanım artışı görülmezken geç dayanımlarda miktarının artmasıyla dayanım artışı görülmektedir. Buna karşın 50 kg kalsit ve PÇ içeren karışımlardan elde edilen beton basınç dayanımları 100 kg kalsit içeren karışımlardan elde edilenlerden büyük olmaktadır. Diğer bir ifadeyle CAC'da kalsit miktarının fazla olduğu ve PÇ'de ise kalsit miktarının az olduğu durumlarda daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Özetle kalsit miktarının artmasıyla CAC içeren karışımların basınç dayanımlarında en belirgin artışın 28. günde %24 oranında olduğu, buna karşın PÇ içeren karışımların basınç dayanımlarında en belirgin azalmanın 7. günde %20 oranında olduğu görülmüştür. Ayrıca bu şekilde dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 125 mikron ve 50 kg kalsit miktarına sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P4aI) olduğu görülmektedir.



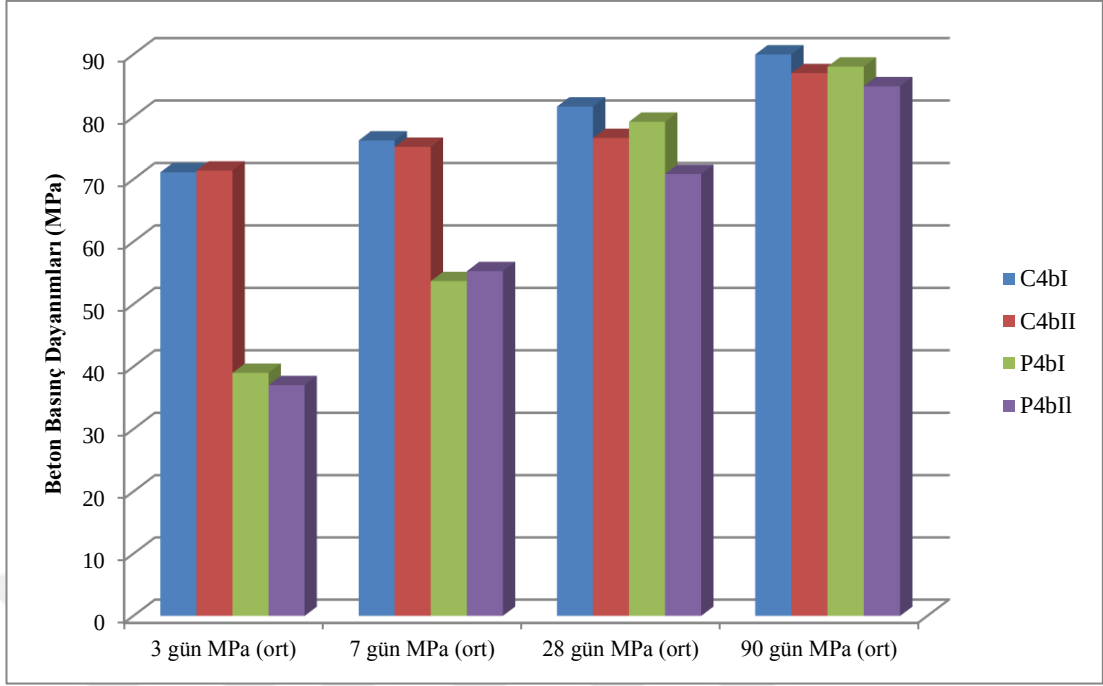
Şekil 4.10: 400 kg çimento ve 125 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

300 kg çimento dozajıyla 10 mikron kalsit içeren karışımlarda kalsit miktarının (50 ve 100 kg) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.11’de verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi C3bII serisi üretilmediği için 100 kg mikronize kalsit içeren karışımlarda kalsit miktarının söz konusu numunelerin basınç dayanımına etkisi kıyaslanamamıştır. Bu şekilden 50 kg kalsit ve PÇ içeren karışımlardan elde edilen erken beton basınç dayanımları ile 100 kg kalsit içeren karışımlardan elde edilenlerden beton basınç dayanımlarının hemen hemen eşit olduğu görülmektedir. Ayrıca CAC ile üretilen beton serilerinde nihai dayanım değeri erken dayanıma göre daha büyük olmaktadır. Diğer taraftan CAC ile üretilen beton numunelerinin erken dayanımları PÇ ile üretilen beton numunelerinin erken dayanımlarının neredeyse 2 katı kadar daha büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bütün deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 10 mikron ve 50 kg kalsit miktarına sahip CAC ile üretilen beton serisinde (C3bl) olduğu görülmektedir.



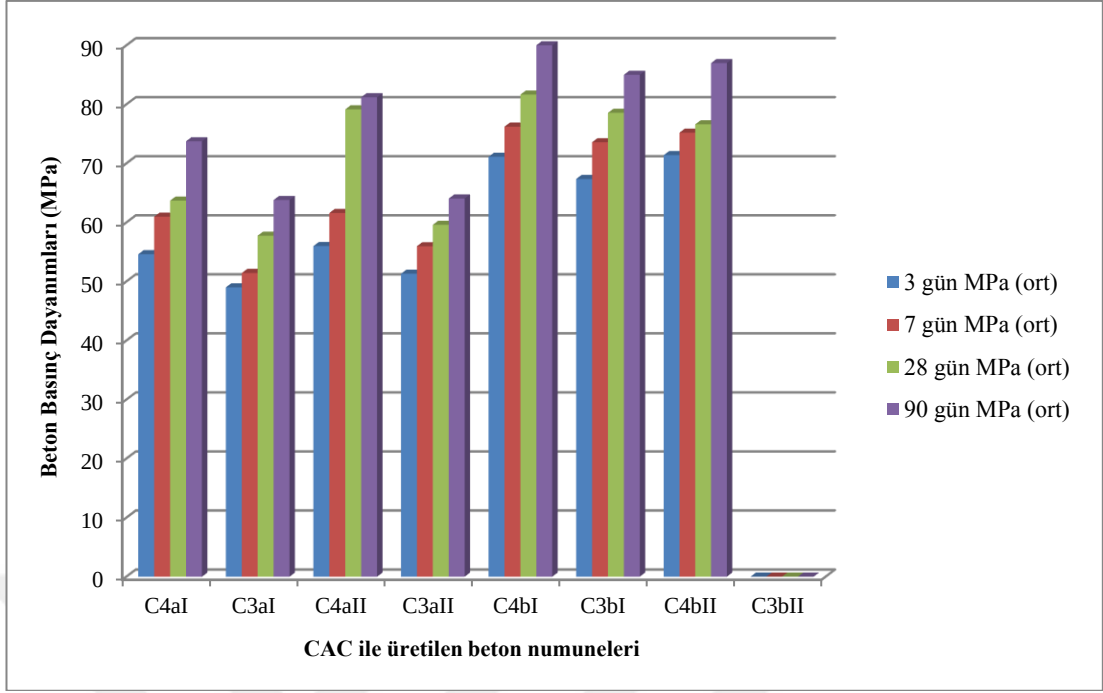
Şekil 4.11. 300 kg çimento ve 10 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

400 kg çimento dozajıyla 10 mikron kalsit içeren karışımlarda kalsit miktarının (50 ve 100 kg) basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.12’de verilmektedir. Bu şekilden CAC ve PÇ içeren karışımlarda erken dayanımlarda kalsit miktarının artmasıyla önemli dayanımlarının hemen hemen aynı olduğu, geç dayanımlarda ise kalsit miktarının artmasıyla dayanımlarda azalma görülmektedir. Ayrıca erken dayanımlarda CAC üretilen beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri PÇ ile üretilen numunelerin basınç dayanımı değerlerinin daha büyük olmaktadır. Ancak nihai dayanımlarda bu farkın azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu şekilde dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 10 mikron ve 50 kg kalsit miktarına sahip CAC ile üretilen beton serisinde (C4bl) olduğu görülmektedir.



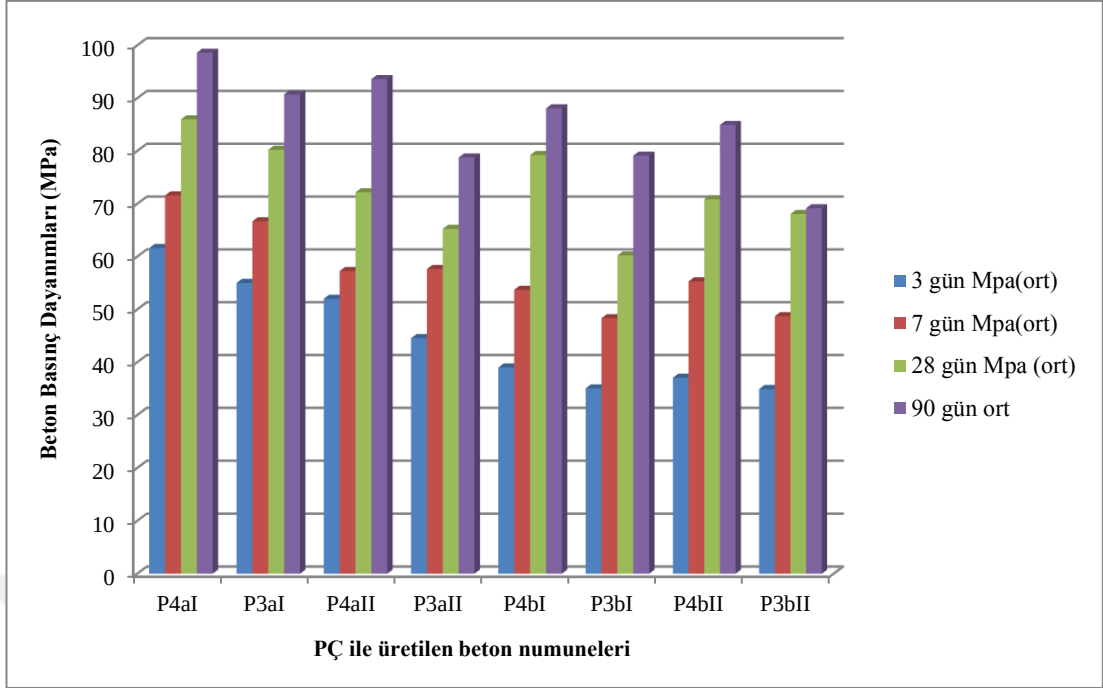
Şekil 4.12. 400 kg çimento ve 10 mikron kalsit içeren beton karışımlarının basınç dayanımları.

CAC ile üretilen beton serilerine çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.13'te verilmektedir. Bu şekilden çimento dozajı attıkça söz konusu numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı ve kalsit inceliğinin azalmasıyla basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca kalsit miktarının artmasıyla 400 doz ve 125 mikron kalsit içeren numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı, 400 doz ve 10 mikron kalsit içeren numunelerin basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, 300 doz ve 125 mikron kalsit içeren numunelerin basınç dayanımı değerlerinin dozaj ve miktarına bağlı olarak fazla değişim göstermediği görülmüştür. Diğer taraftan 300 doz ve 10 mikron 100kg kalsit içeren beton numuneleri üretilemediğinden söz konusu serileri kıyaslanamamıştır. Ayrıca bu şekilde dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 400 doz, 10 mikron ve 50 kg kalsit miktarına sahip CAC ile üretilen beton serisinde (C4bl) olduğu görülmektedir.



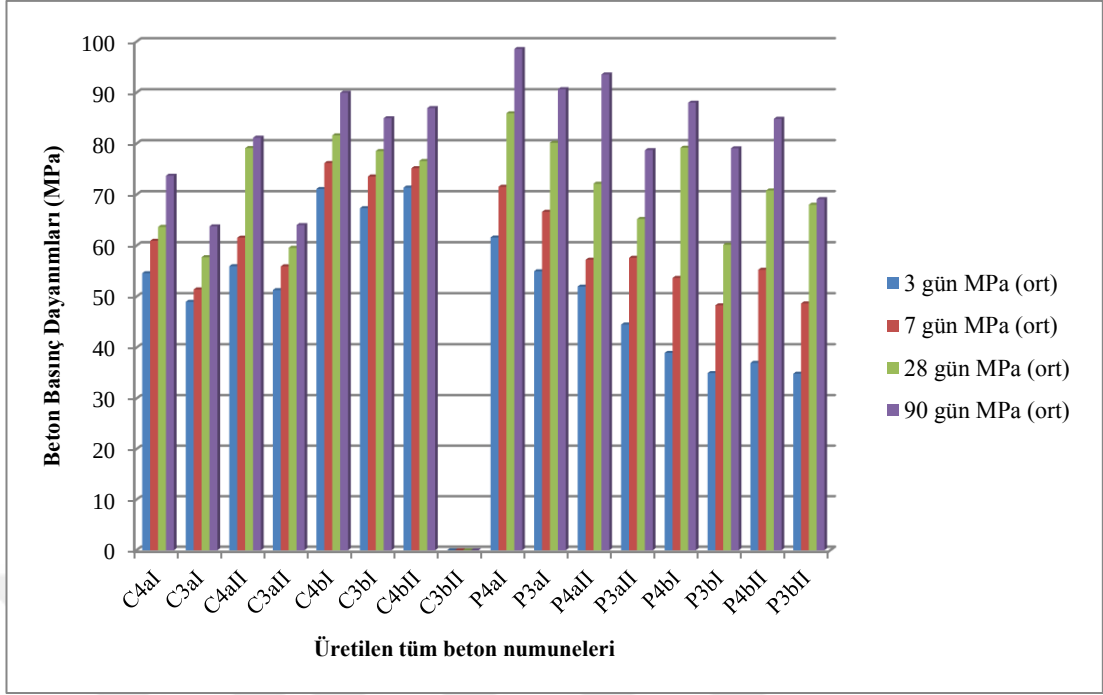
Şekil 4.13. CAC ile üretilen beton serilerinin basınç dayanımlarına çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin etkisi.

PÇ ile üretilen beton serilerine çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin basınç dayanımlarına etkisi Şekil 4.14'te verilmektedir. Bu şekilden çimento dozajı attıkça söz konusu numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı ve kalsit inceliğinin azalmasıyla basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca kalsit miktarının artmasıyla 400 doz 10 mikron ve 125 mikron kalsit içeren numunelerin basınç dayanımı değerlerinin ve 300 doz 10 mikron ve 125 mikron kalsit içeren numunelerin basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Diğer taraftan dikkate alınan deney serilerinde en yüksek basınç dayanımının 400 doz, 125 mikron ve 50 kg kalsit miktarına sahip PÇ ile üretilen beton serisinde (P4aI) olduğu görülmektedir.



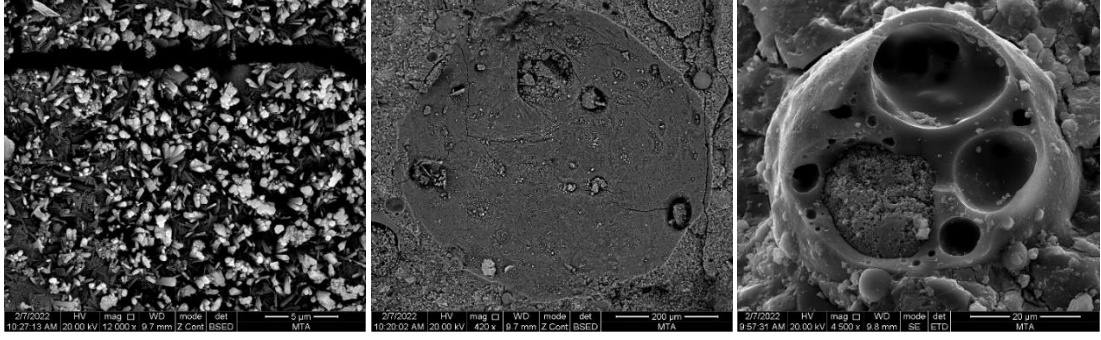
Şekil 4.14. PÇ ile üretilen beton serilerinin basınç dayanımlarına çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin etkisi.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucu CAC ve PÇ ile üretilen bütün numune serilerinin çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişimlerinin söz konusu numunelerin basınç dayanımına etkisi Şekil 4.15'te verilmektedir. Tüm deney serileri karşılaştırıldığında en yüksek erken basınç dayanımının 100 kg 10 mikron kalsit ve 400 doz CAC içeren beton serisinde (C4bII) olduğu görülmektedir. Ayrıca 10 mikron kalsit ile üretilen beton numune serilerinin 125 mikron ile üretilen numune serilerine göre daha yüksek erken basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte en düşük erken dayanıma sahip numunelerin ise 10 mikron kalsit ve PÇ ile üretilen seriler olduğu görülmektedir. Diğer taraftan en yüksek nihai basınç dayanımı 50 kg 125 mikron kalsit ve 400 doz PÇ içeren beton serisinde (P4aI) görülmüştür. Ayrıca 10 mikron kalsit ve CAC içeren beton numunelerinin basınç dayanım değerlerinin pratik olarak eşit olduğu buna karşın 10 mikron kalsit ve PÇ içeren beton numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde belirgin bir şekilde artış olduğu görülmektedir.

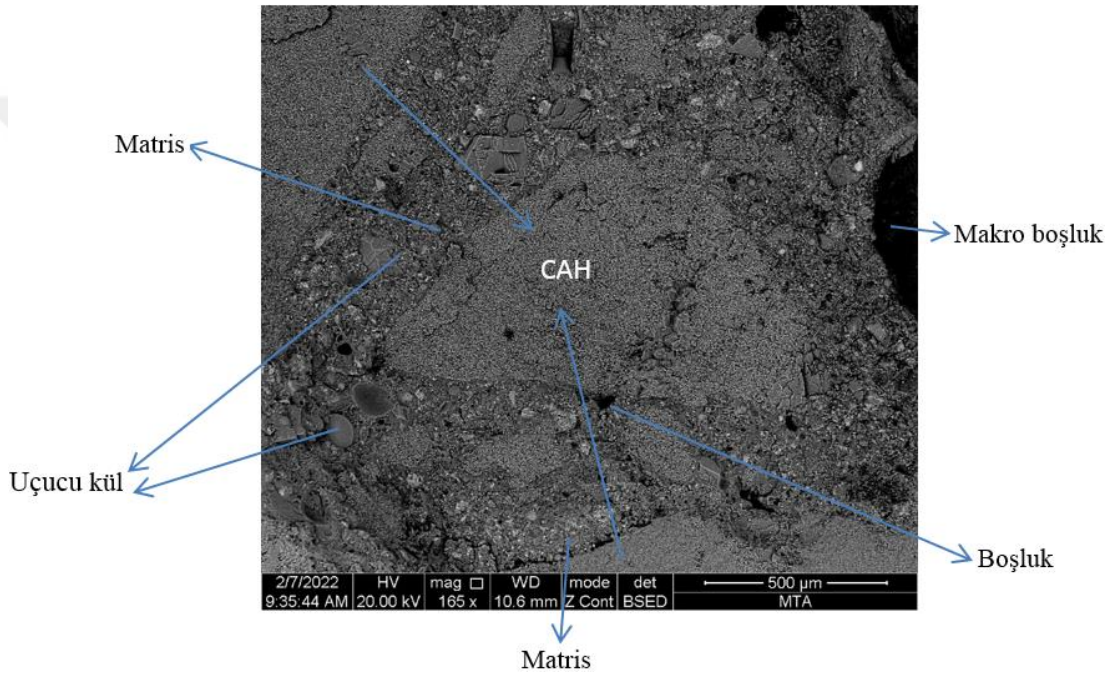


Şekil 4.15. Üretilen tüm beton serilerinin basınç dayanımlarına çimento türü, çimento dozajı, kalsit inceliği ve kalsit miktarı değişiminin etkisi.

C4bII beton numunesinin sem görüntüleri sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 17’de verilmektedir. Bu sem görüntüsünden, matris ve agregaların homojen olarak dağıldığı, agrega-çimento ara yüzünün yaklaşık 10-20 mikron arasında olduğu görülmektedir. Ayrıca bu görüntüden, iri agregalarda ara yüz çok belirgin gözlemlenmese de belli noktalardan ölçüm yapılabilmektedir. 100 mikrondan daha küçük agregalarda ise agrega-çimento ara yüzünde belirgin boşluklar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra matrise dağılmış küresel geometrili UK’lerinde gözlemlendiği söylenebilir. Diğer taraftan matris dokusunun çok bileşenli fazda aşırı mikroporoz yapıya sebep olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen yapıda makro boşluk oluşumuna nadiren rastlanılmasına karşın mikronize kalsitlere rastlanılmamıştır. Bunun nedeninin ise ölçek boyutlarının çok küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



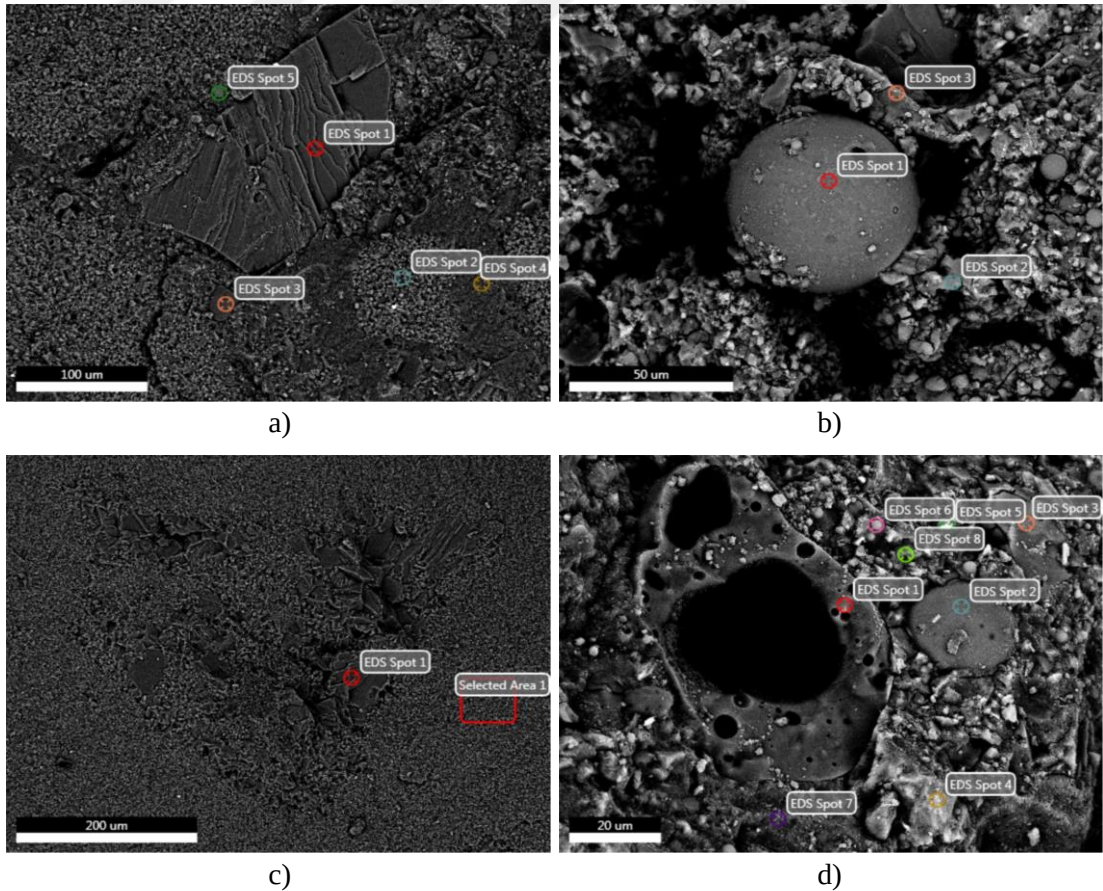
Şekil 4.16. C4bll numunesinin farklı mikroskobik yapıların görünüşleri.



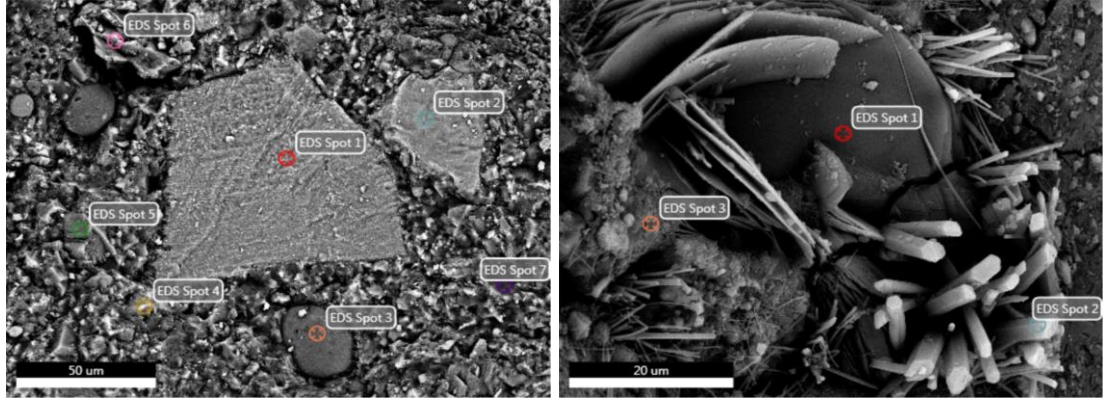
Şekil 4.17. C4bll numunesinin sem görüntüsü.

C4bll numunesinin EDS görüntüleri sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmektedir. Şekil 4.18a'daki EDS analizinden elde edilen sonuçlara göre EDS spot 1 olarak gösterilen yer kalsiyum karbonat yapısı olarak tanımlanmaktadır. EDS analizi sonucunda Spot 2'de gösterilen yerin mikronize kalsit olduğu anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 4.20). Ayrıca EDS Spot 2'de görülen toz bileşenin etrafının çimento matrisi ile sarılmış olduğu görülmektedir. Bu bileşenin de yaklaşık olarak çapı 100 mikron ölçülmektedir. Bununda mikro boşluk içinde çökelmiş kalsit yığını olduğu söylenebilir. Bu yığın oluşumunun sebebinin ise karışımda kullanılan mikser olduğu düşünülmektedir. EDS spot 4'te verilen elementer analize göre yaklaşık %93'ünün kalsiyum alüminat silikat hidrat yapısından oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte

EDS spot 5'te çok belirgin bir geçiş zonu tespit edilememiştir. Bu durumun nedeninin ise SD'den kaynaklamış olabileceği düşünülmektedir. Yapıya genel bakıldığında mikronize kalsitin belirli bölgelerinde bağlayıcı matrise dönüştüğü ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.18b'deki EDS spot 1 noktası UK'yi temsil etmektedir. EDS spot 2 ve spot 3 CAC'nin ana bileşeni olan kalsiyum alüminat hidrat yapısıdır (bkz. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22). Şekil 4.18c'deki selected area 1'de gösterilen bölgenin mikronize kalsit yığını olduğu görülmektedir. Şekil 4.18d'de EDS Spot 1'e bakıldığında reaksiyona dahil olmamış UK olduğu görülmektedir. EDS Spot 2'nin ise kalsiyum alüminat hidrat yapısı olabileceği gibi SD ile oluşan bir reaksiyon ürünü de olabileceği düşünülmektedir. EDS spot 3 kalsiyum alüminat hidrat ( $C_3AH_6$ ) yapısıdır. Ayrıca incelenen molekülde bir miktar karbonat olduğu da görülmektedir. EDS spot 4'te görülmekte olan yapı kalsiyum alümina hidrat ( $C_3AH_6$ ) yapısıdır. EDS spot 6 ve spot 7'de ise kalsiyum alümina silikat hidrat yapılarının olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 4.23).

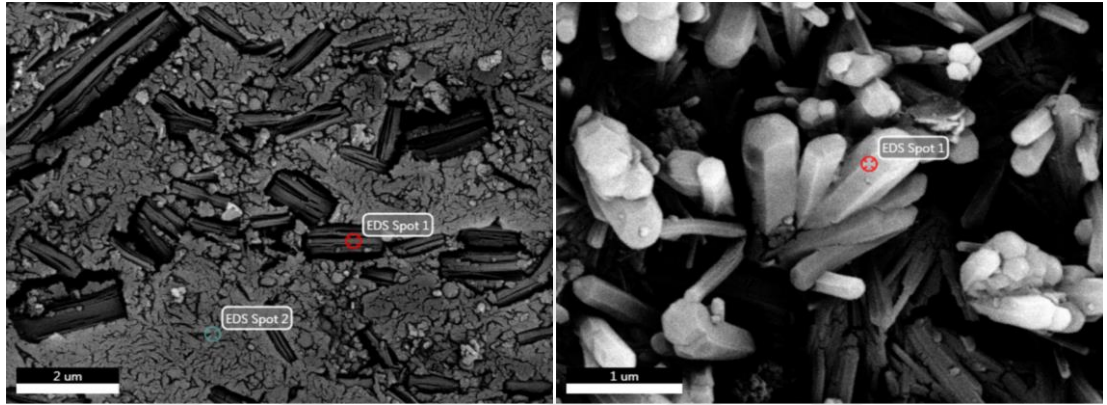


Şekil 4.18. C4bll numunesinin farklı EDS görüntüleri.



a)

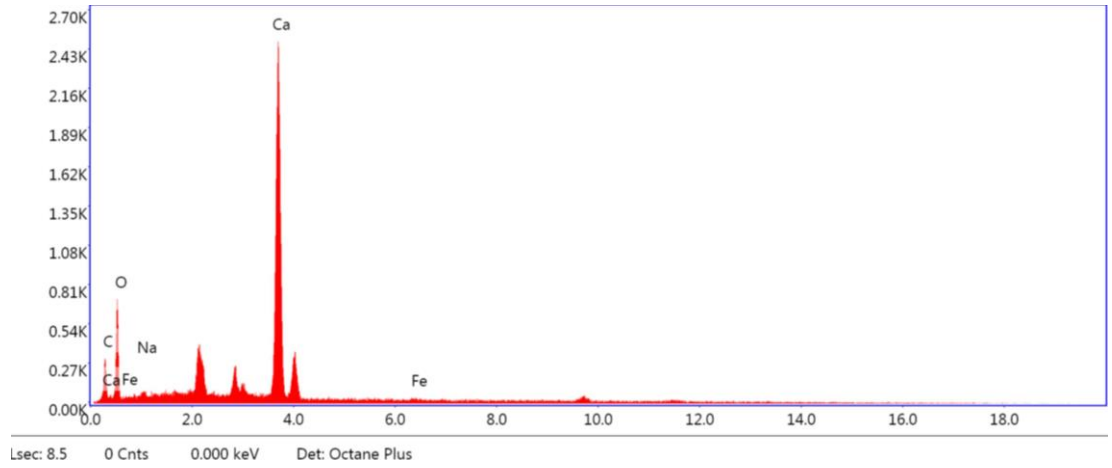
b)



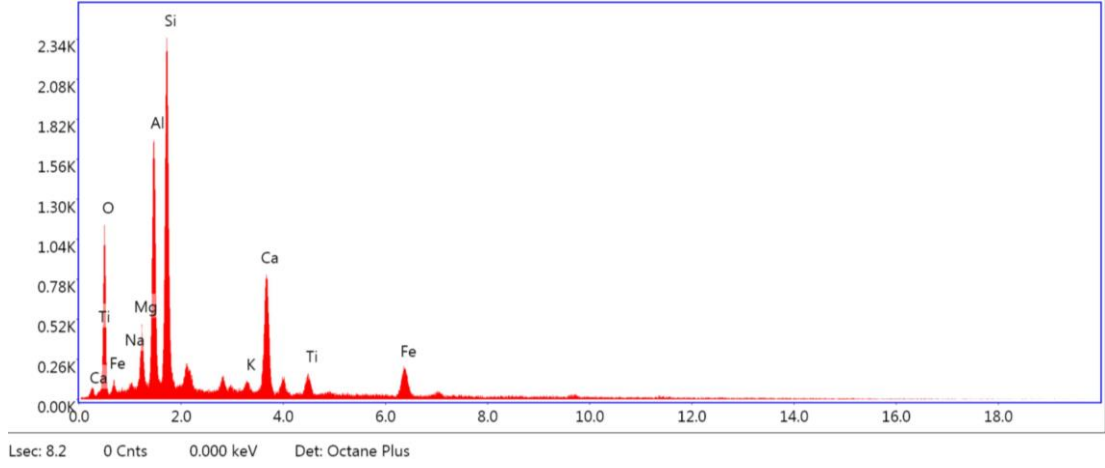
c)

d)

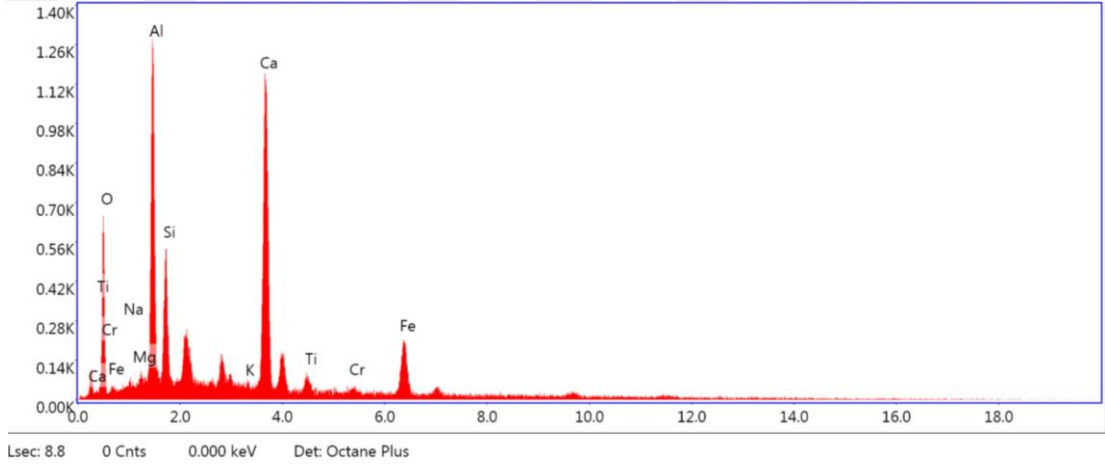
Şekil 4.19. C4bll numunesinin diğer EDS görüntüleri.



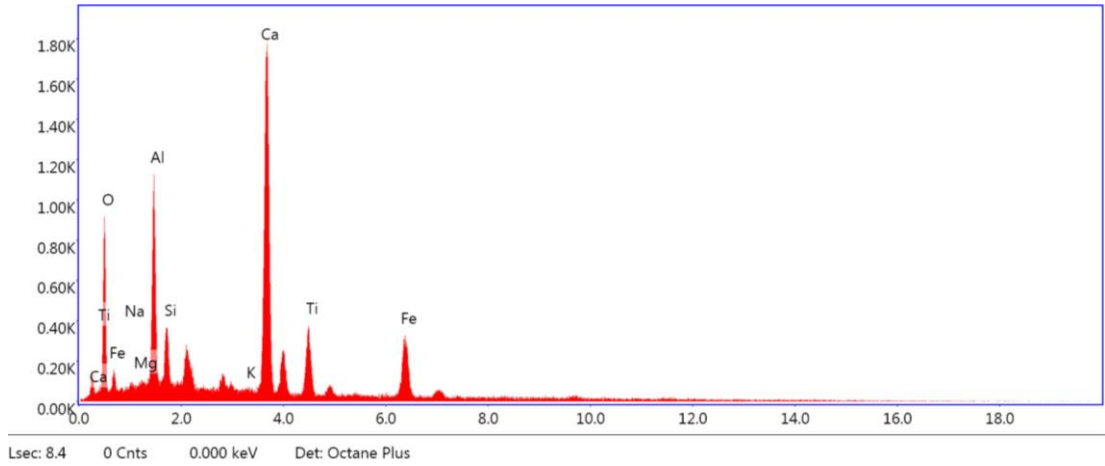
Şekil 4.20. C4bll numunesinin EDS analiz grafiği.



Şekil 4.21. C4bll numunesi spot 1'in EDS analiz grafiği.

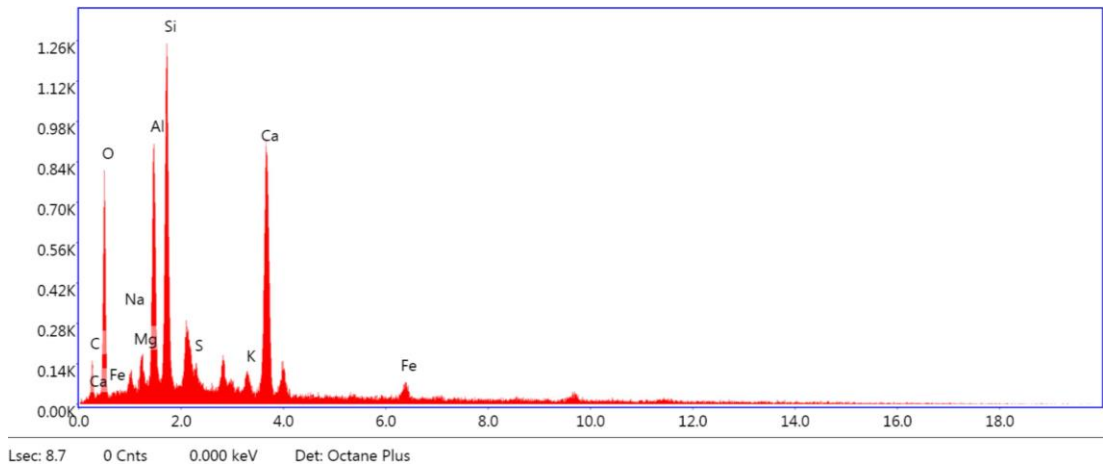


Şekil 4.22. C4bll numunesi spot 2'nin EDS analiz grafiği.

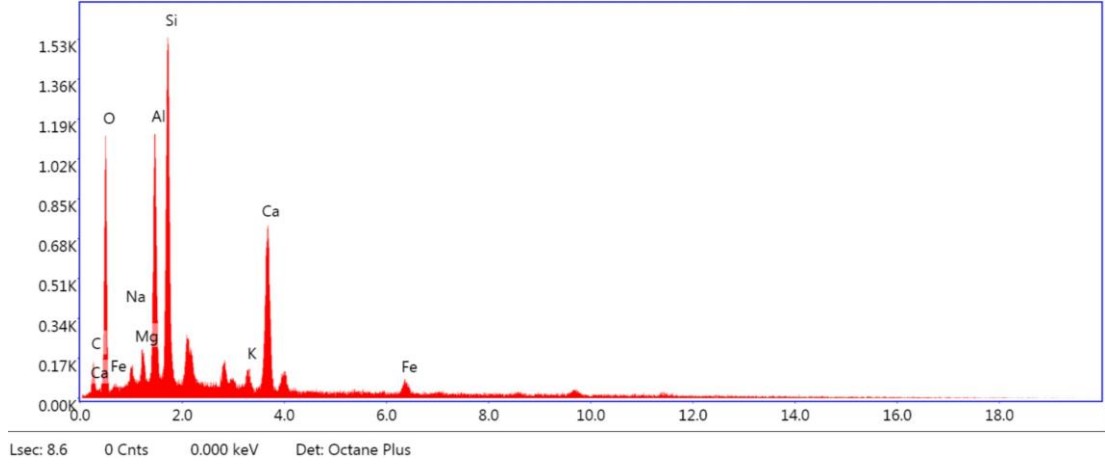


Şekil 4.23. C4bll numunesi spot 4'ün EDS analiz grafiği.

Şekil 4.19a'daki EDS spot 1 ve 2'deki yapıların kalsiyum alüminat silikat hidrat yapıları olduğu görülmektedir. Bu görüntüde EDS Spot 4'te kalsiyum alüminat hidrat yapılarıdır. Oluşan bu yapıların blok blok oluştuğu ve süreklilik arz etmediği görülmektedir. Ayrıca bu yapılar çok küçük boyutlarda parça parça oluşmaktadırlar. Bu nedenle geç dayanımlarının beklenenden daha düşük olduğu söylenebilmektedir. Bununla birlikte EDS spot 5 ve spot 6'da görülen yapılar kalsiyum karbonat yapılarıdır. EDS Spot 7'de görülmekte olan yapı kalsiyum alüminat hidrat yapısıdır. Gözlemlenen bu yapıda oldukça yüksek oranda karbonatlaşma olduğu görülmektedir. Şekil 4.19b'deki EDS spot 1 güzel gelişmiş bir kalsiyum alüminat hidrat yapısını göstermektedir. EDS spot 2'nin kalsiyum alüminat hidratın karbonatlı hali olduğu düşünülmektedir. Ayrıca burada yüksek derecede karbonatlaşmış bir kalsiyum alüminat hidrat yapısı görülmektedir. EDS spot 3'te kalsiyum alüminat silikat hidrat yapı olup yüksek oranda karbonatlaşmış olduğu gözlemlenmektedir. Yapılan incelemelere göre EDS spot 7 içinde gehlenit yapıya rastlanılmıştır. Şekil 4.19c'deki EDS spot 1 yapısının gehlenit yapısı olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 4.24). EDS spot 2 henüz oluşmamış bir gehlenit formunda karbonatlaşmış bir kalsiyum alüminat silikat hidrat yapısıdır (bkz. Şekil 4.25). Şekil 4.19d'deki EDS spot 1'de gehlenitin farklı bir kristal formu olduğu görülmektedir.

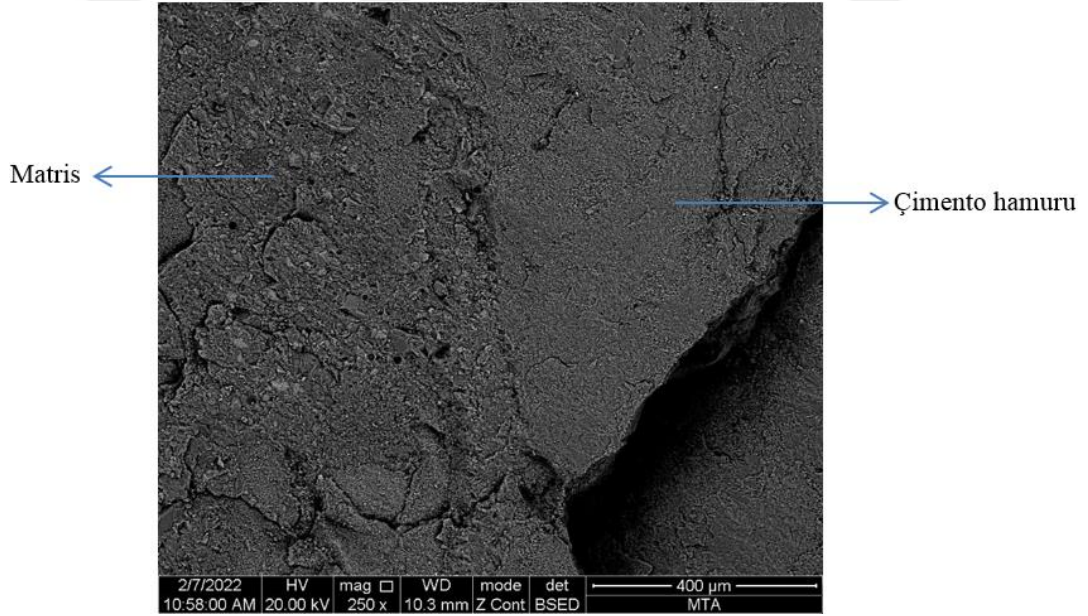


Şekil 4.24. C4bll numunesi gehlenit formunun EDS analiz grafiği.



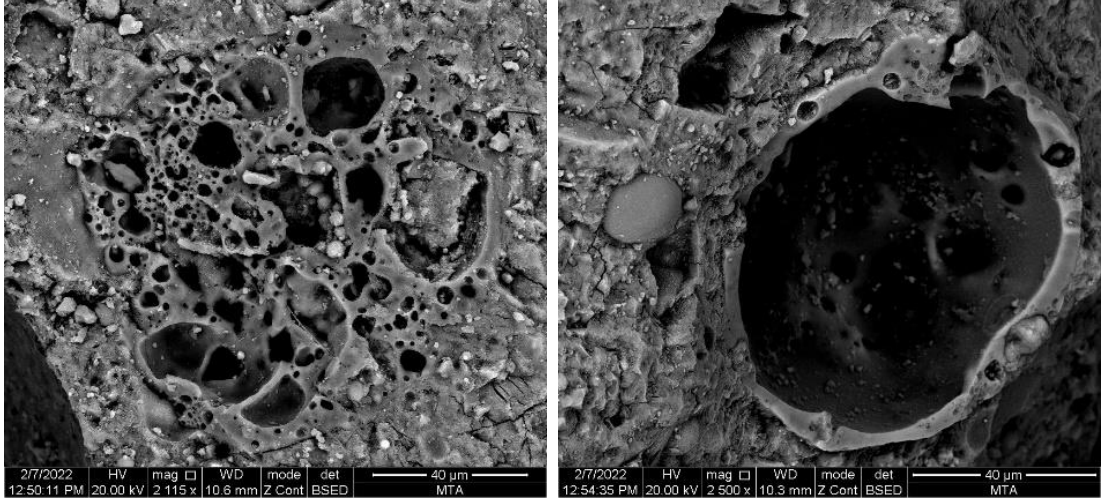
Şekil 4.25. C4bll numunesinin spot 2’deki oluşmamış gehlenit formu karbonatlaşmış bir kalsiyum alüminat silikat hidrat yapısının EDS analiz grafiği.

P4bll beton numunesinin sem görüntüsü Şekil 4.26’da verilmektedir. Bu şekilden çimento hamuru ve partiküllere ayrılmış yapı görülmektedir. Aynı zamanda yapılarda kırılmalar olduğu görülmekte olup, bunun dayanımı olumsuz etkilediği düşünülmektedir.



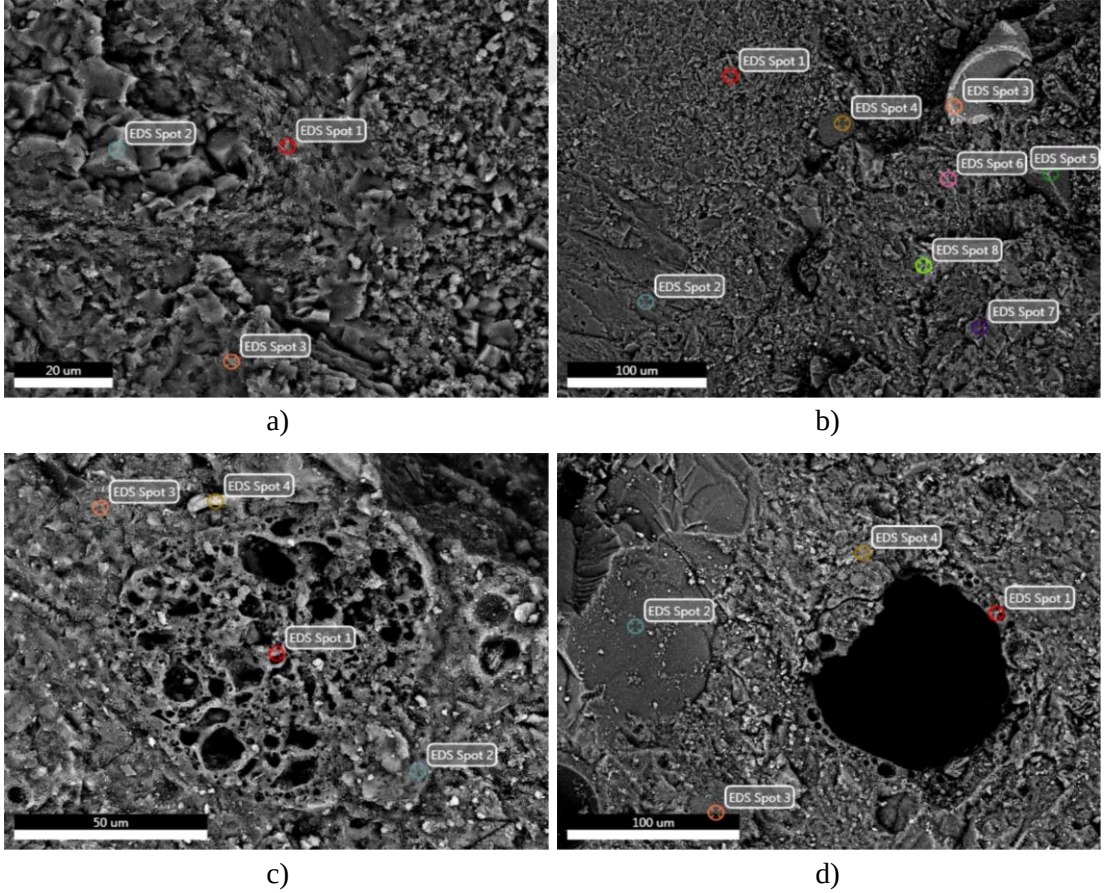
Şekil 4.26. P4bll beton numunesinin sem görüntüsü.

P4bll beton numunesinin yapılan analizi sırasında belirli bölgelerde reaksiyona katılmayan UK’ler tespit edilmiş olup, bunların yapı içindeki görünimleri Şekil 4.27’de verilmektedir.



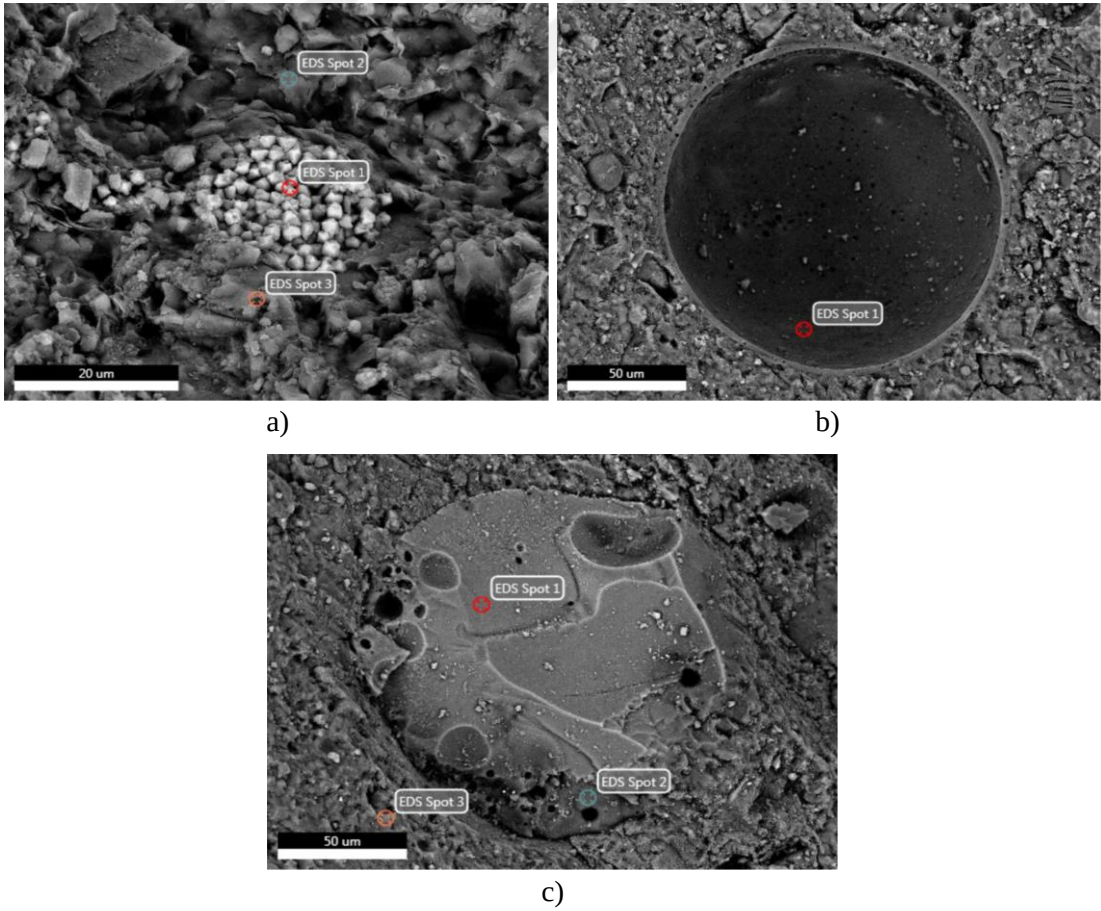
Şekil 4.27. Reaksiyona katılmayan UK'lerin görünüşleri.

P4bll numunesinin EDS görüntüleri sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmektedir.

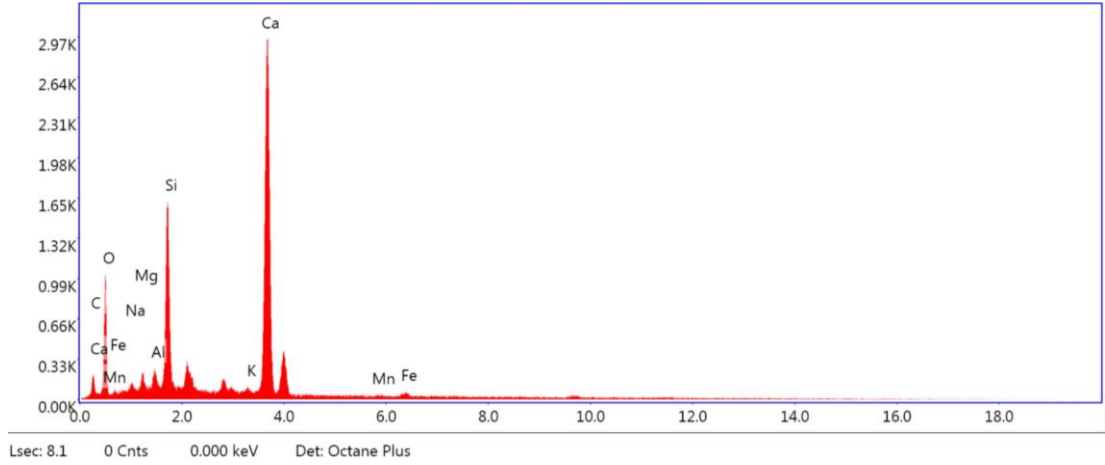


Şekil 4.28. P4bll numunesinin EDS görüntüleri.

Şekil 4.27a'daki EDS spot 2 ve spot 3'ün kalsiyum karbonat yapısında oldukları görülmektedir. Ayrıca tüm EDS görüntülerinde karbonatlaşmış yapılar olduğu görülmektedirler. Şekil 4.27b'deki EDS spot 1 ve spot 2 olarak gözlemlenen yapıların kalsiyum karbonat yapıları olduğu tespit edilmiştir. EDS spot 3'ün Fe ve Mn'li yapılardan oluşan bir yapı olduğu, bununla birlikte EDS spot 4'ün alüminat silikat hidrat yapıları olduğu görülmektedir. Yine bu görüntüden EDS spot 5, 7 ve 8'in kalsiyum karbonat yapısı olduğu, ancak spot 6 yapısının kalsiyum silikat hidrat yapısı olduğu görülmüştür. Şekil 4.27c'deki EDS spot 1'in UK, spot 2'nin alüminat silikat hidrat yapısı ve spot 3'ün ise kalsiyum silikat hidrat olduğu, ancak bir miktar karbonatlaşmış yapının olduğu görülmektedir. Bu görüntüdeki spot 4 ise portlantit yapısıdır (bkz. Şekil 4.30). Bu görüntüde UK'ün tamamen reaksiyona giremediği ve 100 mikron boyutlarında boşluklu yapı oluşturduğu görülmüş ve bunun da dayanıma olumsuz etki yaptığı düşünülmektedir. Şekil 4.22d'de ise EDS spot 1 ve spot 4'ün UK, spot 2'nin agrega, spot 3'ün alümina silikatlı yapı olduğu görülmektedir.

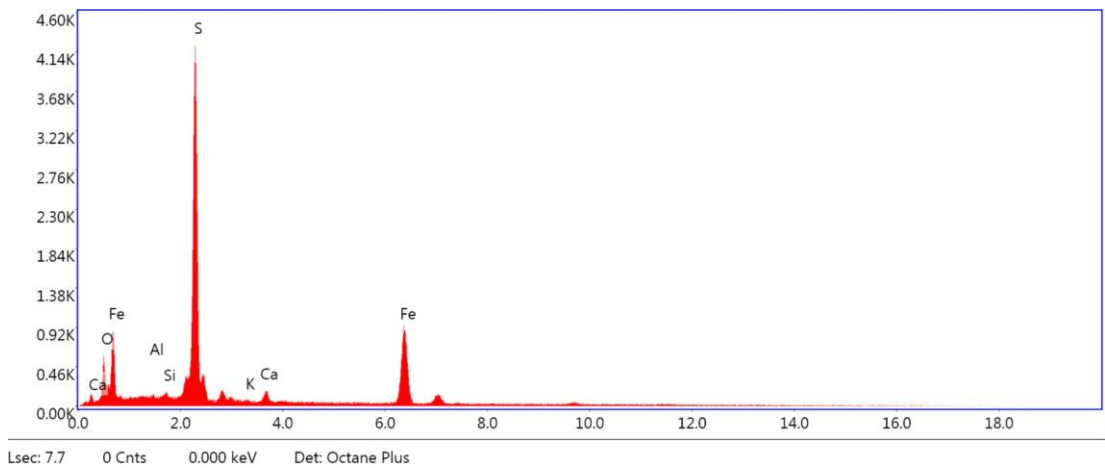


Şekil 4.29. P4bll numunesinin diğer EDS görüntüleri.

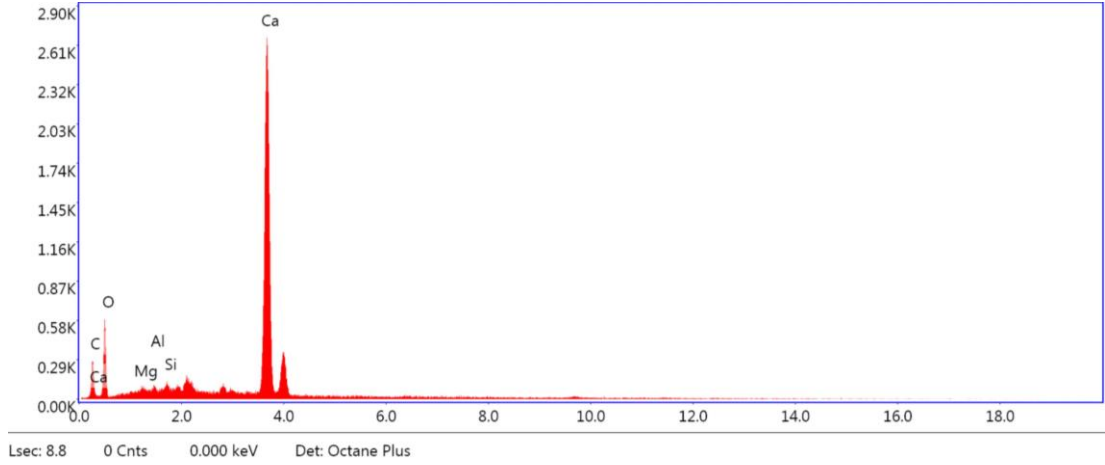


Şekil 4.30. P4bll numunesi spot 4'ün EDS analiz grafiği.

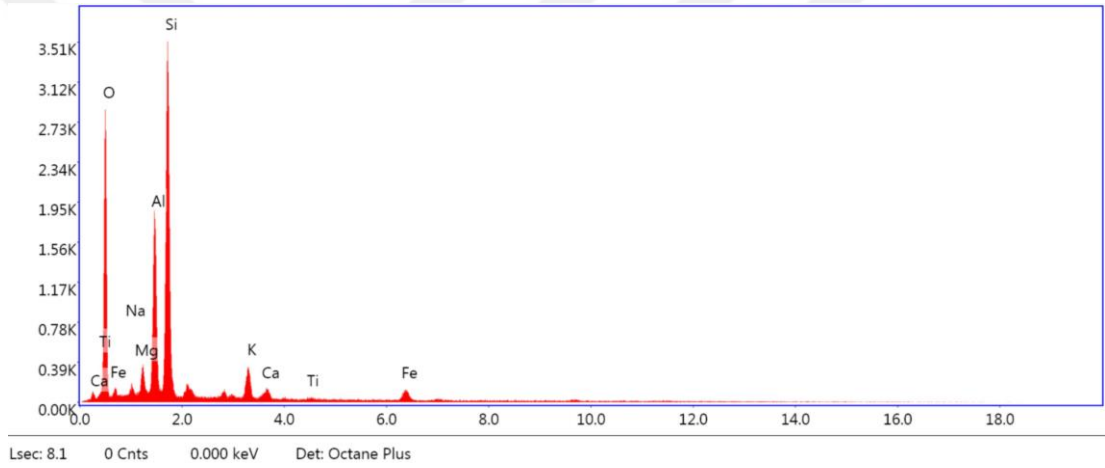
Şekil 4.28a'daki spot 1'de silikatlı bir yapı olduğu görülmektedir. Bunun mikron boyutuna bakıldığında yapının dağılmamış silis dumanı olduğu düşünülmekle birlikte karışım homojen dağılmamış olabileceğinden de kaynaklandığı düşünülmektedir (bkz. Şekil 4.31). Yine bu görüntüdeki spot 2 karbonatlaşmış alümina silikat ve spot 3 ise kalsiyum karbonat yapısıdır (bkz. Şekil 4.32). Şekil 4.28b'deki spot 1 UK'dür (bkz. Şekil 4.33). Şekil 4.28c'deki görüntünün UK ve SD'nin birlikte reaksiyonuyla oluşan oldukça sert bir alümina silikat hidratlı bir yapı olduğu düşünülmektedir. Yine bu görüntüdeki spot 3 çimento matrisidir (bkz. Şekil 4.34).



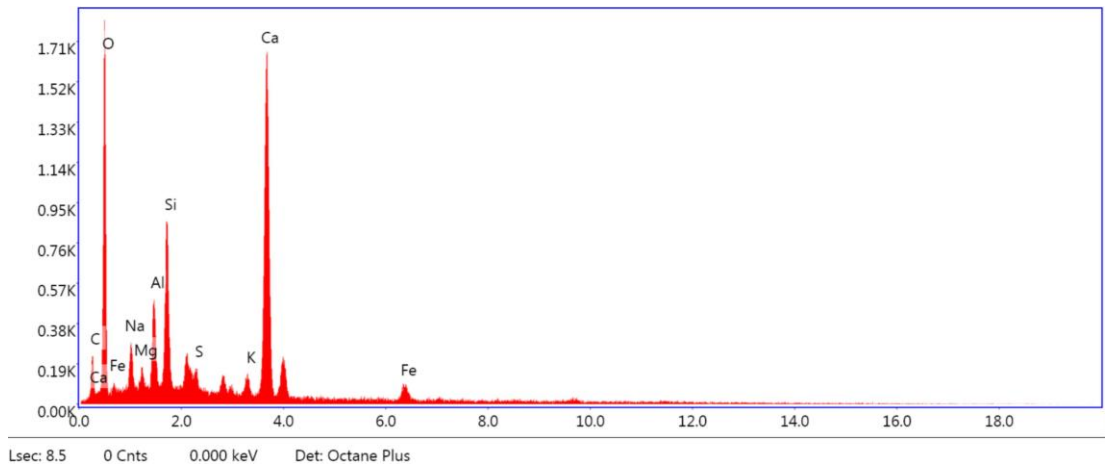
Şekil 4.31. P4bll numunesi spot 1'in EDS analiz grafiği.



Şekil 4.32. P4bll numunesi spot 3'ün EDS analiz grafiği.



Şekil 4.33. P4bll numunesi spot 1'deki UK'nin EDS analiz grafiği.



Şekil 4.34. P4bll numunesi çimento matrisi EDS analiz grafiği.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bağlayıcı malzeme olarak mikronize kalsit, UK ve SD kullanılmasıyla akıcı betonların erken basınç dayanımına kalsit inceliğinin, çimento tipi ve dozajının ve kalsit miktarının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- 1) Deneysel çalışmada kullanılan mikronize kalsitin inceliğinin ve miktarının artmasıyla söz konusu beton numunelerinin erken dayanımına olumlu etkisi olduğu görülmüştür.
- 2) Karışımlarda çimento miktarının artmasıyla hem CAC hem de PÇ üretilen numunelerde dayanım artışı olmuştur.
- 3) Kalsit inceliğinin 125 mikron olduğu ancak miktarının farklı olduğu karışımlarda çimento miktarının artmasıyla erken dayanımlardaki PÇ ve CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları birbirine yakın olmakla birlikte geç dayanımlarda PÇ ve CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları arasındaki farkın arttığı görülmüştür.
- 4) Kalsit inceliğinin 10 mikron olduğu ancak miktarının farklı olduğu karışımlarda çimento miktarının artmasıyla erken dayanımlarda CAC'den elde edilen beton basınç dayanımları ile PÇ'dan elde edilenlerin hemen hemen 2 katı kadar iken geç dayanımlarda PÇ ve CAC'dan elde edilen beton basınç dayanımları arasındaki fark azalmaktadır.

- 5) CAC'dan üretilen kalsit inceliğinin 10 mikron olduğu numunelerde kalsit inceliğinin 125 mikron olduğu numunelere göre erken dayanımlarda daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği görülmüştür.
- 6) Kalsit inceliğinin artmasıyla CAC içeren beton karışımlarının basınç dayanımlarının arttığı buna karşın PÇ içeren beton karışımlarının basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuç kalsit inceliğinin beton basınç dayanımını önemli derecede değiştirdiğini göstermektedir.
- 7) Kalsit miktarının artmasıyla 300 dozlu CAC içeren beton karışımlarının basınç dayanımlarının hemen hemen aynı olduğu buna karşın 400 dozlu CAC içeren beton karışımlarının basınç dayanımlarında ise önemli derecede artış olduğu görülmektedir.
- 8) Kalsit miktarının artmasıyla PÇ içeren beton karışımlarının basınç dayanımlarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuç kalsit miktarının PÇ ile üretilen numunelerde CAC'ye göre beton basınç dayanımını önemli derecede değiştirdiğini göstermektedir.
- 9) Yapılan tüm deney serileri karşılaştırıldığında en yüksek erken basınç dayanımının 100 kg 10 mikron kalsit ve 400 doz CAC içeren beton numunesi serisinde (C4bll) olduğu görülmüştür.
- 10) Yapılan deneylerden 10 mikron kalsit ile üretilen beton numune serilerinin 125 mikron ile üretilen numune serilerine göre daha yüksek erken basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.
- 11) Deneyisel çalışma sonucunda en yüksek nihai basınç dayanımının 50 kg 125 mikron kalsit ve 400 doz PÇ içeren beton serisinde (P4al) olduğu görülmüştür.
- 12) CAC ile üretilen numuneler 24 saat 100 °C sıcaklıkta etüvde bekletildikten sonra dayanımlarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

- 13) Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sırasında CAC'da kalsit miktarı 100 kg olan karışımların priz sürelerinin uzadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuç söz konusu betonların içerdikleri ince malzeme oranının artmasıyla priz sürelerinin uzadığını göstermektedir.
- 14) Yapılan deneysel çalışmalar, polikarboksilat esaslı kimyasal katkı miktarının artmasıyla priz sürelerinde artış olduğunu göstermiştir.
- 15) Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, bu çalışmada dikkate alınan iki tip çimentoda da karışımlarda bulunan SD ve UK katkılarının nihai beton basınç dayanımlarına olumlu katkılarının olduğunu göstermiştir.

## KAYNAKLAR

ACI, “Use of fly ash in concrete”, *ACI Materials Journal*, 84:381-409 (1987).

Aitchin, P. C., “The durability characteristics of high performance concrete: a review”, *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5):409-420 (2003).

Akçaözoğlu, K. ve Güldür, Ş. E., “Mikronize kalsit ve uçucu kül katkısının betonun özelliklerine etkisinin araştırılması”, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering Dergisi* 17: 658-668 (2017).

Akkaya, Y. ve Kesler, Y. E., “Mikrokalsit katkısının betonun işlenebilirliğine, mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisi”, *İMO Teknik Dergi*, 384, 6051-6061, (2012).

Akman, M. S., “Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi”, Bilimsel Doktora Tezi, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426:30-36, (2003).

Aruntaş, H. Y., Dayı, M., Tekin, İ., Birgül, R. ve Şimşek, O., “Kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine atık mermer tozunun etkisi”, *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, 173-180 (2007).

Aruntaş, H. Y., Gürü, M., Dayı, M. ve Tekin, İ., “Utilization of waste marble dust as an additive in cement production”, *Materials and Design*, 31(8):4039-4042 (2010).

ASTM C618, “Standart specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete”, *Annual Book of ASTM Standards*, No:4, (1998).

Bekem Kara, İ., “Kalsitin çimento ile ikame malzemesi olarak kullanımının basınç dayanımına etkisi”, *Journal of Investigations on Engineering & Technology Dergisi*, 3(1): 10-16, (2020).

Berry, E. E. and Malhotra, V. M., “Fly ash in concrete”, *CANMET, Energy, Mines and Resources*, Ottawa, (1986).

Boğa, A. R., Kürklü, G. ve Ergün, A., “Mermer tozu katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *The 2<sup>nd</sup> International Symposium on Environment and Morality “ISEM2014”*, Adıyaman, 1239-1248 (2014).

Bonavetti, V., Donza, H., Menendez, G., Cabrera, O. and Irassar, E. F., “Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy”, *Cement and Concrete Research*, 33: 865–871 (2003).

Bonavetti, V. L., Donza, H., Rahhal, V. F. and Irassar, E. F., “High strength concrete with limestone filler cements (*high-performance concrete and performance and quality of concrete structures*)”, **ACI SP-186 American Concrete Institute**, Farmington Hill, MI, 567-580 (1999).

Carette, G. G., Malhotra, V. M. and Aitcin, P. C., “Preliminary data on long-term strength development of condensed silica fume concrete”, **Canmet Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete**, Montreal, (1987).

Colleparadi M., Monosi, P. and Piccioli, P., “The influence of Pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement”, **Cement and Concrete Research**, 25:961-968 (1995).

ÇİMSA, “Çimsa ISIDAÇ 40 Kalsiyum alüminat çimentosu yapı kimyasalları uygulamaları”, **ÇİMSA Ürün Kataloğu**, (2021).

Dodson, V.H., “Concrete admixtures”, **Van Nostrand Reinhold Structural Engineering Series**, (1990)

DPT, “Madencilik özel ihtisas komisyonu ‘endüstriyel hammaddeler alt komisyonu genel endüstri mineralleri I çalışma grubu’ raporu, **Devlet Planlama Teşkilatı Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı**, Ankara, (2001).

Duval, R. and Kadri, E. H., “Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes”, **Cement and Concrete Research**, 28(4):533-547, (1998).

Elkhadiri, I., Diouri, A. and Boukhari, A., “Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in Moroccan Portland cement”, **Cement and Concrete Research**, 32:1597-1603 (2002).

Erdem, R.T. ve Öztürk, A.U., “Mermer tozu katkısının çimento harcı donma-çözünme özellikleri üzerine etkisi”, **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 1(2):85-91 (2012).

Erdoğan, T. Y., “Beton”, **ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş.** Ankara, (2003).

Erdoğan, T. Y., “Sorular ve yanıtlarıyla beton malzemeleri”, **Türkiye Hazır Beton Birliği**, İstanbul, (2004).

Felekoğlu, B., “Kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, (2003).

Felekoğlu, B., Tosun K., Baradan, B., Altun, A. ve Uyulgan, B., “The effect of fly ash and limestone fillers the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars”, **Cement and Concrete Research**, 36:1719-1726 (2006).

Fujiwara, H., Nagataki, S., Otsuki, N. and Endo, H., “Study on reducing unit powder content on high-fluidity concrete by controlling powder particle size distribution”, **Transl. Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.**, 30 (532):117-127 (1996).

Gödek, E., Felekoğlu, B. ve Felekoğlu, K. T., “Hazır beton sektörüne uygun polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı seçimi ve kendiliğinden yerleşen beton üretimindeki performansı”, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 15:8-18 (2015).

Güneşli U., “Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması”, Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, (2008).

Gürbüz, E., “C tipi uçucu küllerin etkinliği”, Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2009).

Haque, M. N., Day, R. L. and Langan B. W., Realistic strength of air -entrained concretes with without fly ash”, **ACI Materials Journal**, 85:241-247 (1988).

Hassan, K. E., Cabrera, J. G. and Maliche, R. S., “The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete”, **Cement and Concrete Composites**, 22:267-271 (2000).

Helmuth, R., “Fly ash in cement and concrete”, **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois, (1987).

Khayat, K. H. and Aitcin, P.C., “Silica fume in concrete: an overview”, **ACI Sp Publication**, S132, Detroit, 835-872 (1992).

Khayat, K. H. and Guizani, Z., “Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete”, **Materials Journal**, 94(4):332-340 (1997).

Kırca, Ö., Yaman, İ. Ö. and Tokyay, M., “Compressive strength development of calcium aluminate cement-GGBFS blends”, **Cement and Concrete Composites**, 35:163-170 (2013).

Matschei, T., Lothenbach B. and Glasser, F. P., “The role of calcium carbonate in cement Hydration”, **Cement and Concrete Research**, 37:551-558 (2007).

Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A. and Brooks, J. J., “Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete”, **Cement & Concrete Composites**, 26:347-357 (2004).

Mehta, P. K. and Gjørv, O. E., “Properties of Portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume”, **Cement and Concrete Research**, 12:587-595 (1982).

MTA, “Kalsit”, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kalsit>, (2021).

Nehdi, M. and Mindess, S., “Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles”, **Cement and Concrete Research**, 28:687-697 (1998).

Okamura, H. and Ouchi, M., “Self compacting concrete”, **Journal of Advanced Concrete Technology**, 1(1):5-15 (2003).

Olek, J. and Diamond, S. “Proportioning of constant paste composition fly ash concrete mixes”, **ACI Materials Journal**, 86:159-165 (1989).

Öner, A., “Uçucu kül ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu içeren betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından optimum bileşiminin belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, (2005).

Özcan, F., “Silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini”, Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, (2005).

Özdemir, E., “PÇ ve mineral katkı maddelerinin ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonlarını içeren harç numunelerinin bazı özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, (2006).

Özturan, T., “Yüksek mukavemetli beton üretiminde mineral katkı maddelerinin etkinliği”, **2. Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul, (1991).

Pacewska, B., Wilinska I. and Nowacka, M., “Studies on the influence of different flu ashes and Portland cement on early hydration of calcium aluminate cement”, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 106:859-868 (2011).

Pala, M., Özbay, E., Öztaş, A. and Yüce, M. İ., “Appraisal of long-term effects of fly ash and silica fume on compressive strength of concrete by neural networks”, **Construction and Building Materials**, 21:384-394 (2007).

Petersson, Ö., “Limestone powder as filler in self-compacting concrete-frost resistance, compressive strength and chloride diffusivity”, **First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete**, Chicago, 391-396 (2002).

Phan, T. L. “High strength concrete at high temperature-an overview”, **International Symposium on Utilization of High Strength High Performance Concrete**, Leipzig, 1-15 (2002).

Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, Ü. A. ve Özkul, M. H. “Kendiliğinden yerleşen beton ve katkı-çimento uyumu”, **Hazır Beton Kongresi**, İstanbul, 213-224 (2004).

Sağlam, A. R., Parlak, N. and Özkul, M. H., “Polikarboksilat esaslı kimyasal katkıların beton üretiminde kullanımı”, **2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu**, 108-120 (2007).

Scheinherrova, L. and Trnik, A., “Hydration of calcium aluminate cement determined by thermal analysis”, *American Institute of Physics*, 1-1866 (2017).

Scrivener, K. L., “Options for the future of cement”, *The Indian Concrete Journal*, 88(7): 11-21 (2014).

Scrivener, K. L., Cabiron, J. L. and Letourneux, R., “High-performance concretes from calcium aluminate cements”, *Cement and Concrete Research*, 29:1215-1223 (1999).

Scrivener, K. L. and Capmas, A., “Lea’s chemistry of cement and concrete”, *John Wiley & Sons*, New York, (1998).

Sivasundaram, V., Carrette, G. G. and Malhotra, V. M., “Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of low- calcium fly ash”, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, 45-73 (1989).

Sucu, M. ve Delibaş, T., “Kalsiyum alüminat çimentosu bazlı tamir betonları”, *Hazır Beton*, 88-94 (2015).

Şimşek, O., “Yapı Malzemesi II”, *Ankara Üniversitesi Basımevi*, Ankara, 2-90 (2000).

Tanyıldızı, H. ve Coşkun, A., “Elazığ yöresi vişne mermer tozu katkılı hafif betonun basınç ve ultrasonik ses geçirgenliği özelliğinin araştırılması”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(2):150-154 (2011).

Taylor, P. C., Kosmatka, S. H. and Voigt, G. F., “Integrated materials and construction practices for concrete pavement: a state-of-the-practise manual”, *Center for transportation research and education Iowa State University*, 69-104 (2006).

Tohumcu, İ. ve Bingöl, A. F., “Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2): 31-44 (2013).

TS EN 196-2, “Çimento deney yöntemleri-Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2013).

TS EN 197-1, “Genel çimentolar: bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2012).

TS EN 206-1, “Beton-Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).

TS EN 450-1, “Uçucu kül-betonda kullanılan-Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2013).

TS 706 EN 12620+A1, “Beton agregaları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2009).

TS EN 934-2+A1, “Kimyasal katkıları-beton, harç ve şerbet için-Bölüm 2: beton kimyasal katkıları-tarifler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2013).

TS EN 12350-2, “Taze beton deneyleri-Bölüm 2: çökme (Slump) deneyi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2019).

TS EN 12350-5, “Taze beton deneyleri yayılma tablası deneyi”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2010).

TS EN 12390-3, “Beton-Sertleşmiş beton deneyleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2019).

TS-500, “Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2000).

Tuyan, M., Soykan, K. S., Namal, İ. ve Andiç Çakır, Ö. “Mineral katkı içeren kalsiyum alüminat çimento esaslı harçların mekanik, dayanıklılık, termal ve içyapı özelliklerinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23 (2): 311-320 (2020).

Türker, K., Birol, T., Yavaş, A. ve Hasgöl, U., “Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16: 776-785 (2016).

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., “Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri”, *TÇMB/ARGE-Y03.03*, Ankara, (2009).

Uyan, M., Öztekin, E. and Gökçe, A., “İnceliğe bağlı olarak uçucu küllü betonların su ihtiyacındaki değişim”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, **4. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı**, İstanbul, 209-221 (1996).

Ünal, O., ‘Yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen beton dayanımına su/ç oranı ve katkıların etkisi’ *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13: 1-8 (2013).

Ünal, O. ve Kibici, Y., “Mermer tozu atıklarının beton üretiminde kullanılmasının araştırılması”, *Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM 2001)*, Afyon, (2001).

Voo, Y. L. and Foster, S. J., “Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its impact on sustainable construction”, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3 (3): 168-187 (2010).

Voo, Y. L., Poon, W. K. and Foster, S. J., “Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups”, *Journal of Structural Engineering*, 136: 1393-1400 (2010).

Yahia, A., Tanimura, M. and Shimoyama, Y., “Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio”, ***Cement and Concrete Research***, 35:532-539 (2005).

Yeğınobalı, A., “Silis dumanının betonda katkı maddesi olarak değeriendirilmesi”, ***Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri***, Ankara, 149-167 (1993).

Yeğınobalı, A. and Erdoğan, K., “Çimento ve betonda mineral katkıları”, ***TÇMB Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü Seminer Notları-4***, Ankara, (1999).

Yılmaz, H., Sallı Bideci, Ö. ve Bideci, A., “Pomza agregalı hafif beton özelliklerine kalsiyum alüminat çimentosunun etkisi”, ***Journal of Engineering Sciences and Design***, 6(1): 154-160 (2018).

Zhu W. and Gibbs J. C., “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, ***Cement and Concrete Research***, 35:1457-1462 (2005).

## ÖZGEÇMİŞ

Nur ÜNAL ilk, orta ve lise öğrenimini Karabük’te tamamladı. 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Yükseköğrenime başlayıp 2013 yılında mezun oldu. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitime başlamıştır. Evli ve bir çocuk annesi olan Nur ÜNAL halen Karabük’te kendi Şirketinde İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktadır.