



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**DOKTORA TEZİ**

**MİNERAL KATKI OLARAK KULLANILAN  
ÖĞÜTÜLMÜŞ DOĞAL ZEOLİTİN  
HARÇ ÖZELİKLERİNE ETKİSİ**

**Aytaç DIĞIŞ**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeoloji Mühendisliği Programı**

**Danışman**

**Prof. Dr. Atiye TUĞRUL**

**Mart, 2015**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 7.04/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeoloji Mühendisliği Programı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi:**



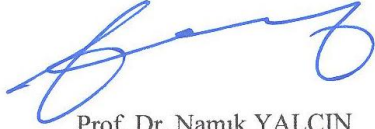
Prof. Dr. Atiye TUĞRUL (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Hasan YILDIRIM  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İnşaat Fakültesi



Prof. Dr. Namık YALÇIN  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Hakan ATAHA  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İnşaat Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 15332 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda ‘‘Mineral Katkı Olarak Kullanılan Öğütülmüş Doğal Zeolitin Harç Özelliklerine Etkisi’’ konulu doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmanın amacı, Türkiye’de yaygın bulunan doğal puzolan kaynaklarından olan zeolitlerin, belirli bir inceliğe getirildikten sonra çimento ve beton üretimi sırasında mineral katkı olarak kullanılmaları durumunda elde edilebilecek teknik üstünlükleri ortaya koymaktır.

Uzun zaman önce yarım bırakılmış tez çalışmamın konu değişikliği yapılarak tamamlanabilmesi için imkan tanıyan ve çalışma süresince değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Atiye TUĞRUL’a teşekkür ederim.

Doç. Dr. Hasan YILDIRIM’a çalışma kapsamındaki harç deneylerinin gerçekleştirilmesi ve yorumlanmasına katkıları dolayısıyla minnettarım.

Ayrıca, farklı konularda samimi yardımlarını gördüğüm, isimleri aşağıda alfabetik sıra ile verilmiş olan ve muhtemelen adını anmayı atlamış olabileceğim diğer kişilere de teşekkür etmek isterim.

A. Orçun KAYA, İnşaat Yük. Müh., Arş. Gör., İTÜ

Esin GÜNAY, Dr., Jeoloji Müh.

E. Gizem DAŞKIRAN, İnşaat Yük. Müh., Arş. Gör., İTÜ

Fulden AKINCI, Kimyager

Hakan GÜLSEREN, İnşaat Yük. Müh.

Mehmet SATILMIŞ, Teknisyen

Murat SOYLU, Doç. Dr., Kimya Müh.

Murat YILMAZ, Yrd. Doç. Dr., Jeoloji Müh., İÜ

Mustafa TURANİ, Teknisyen

Namık AYSAL, Yrd. Doç. Dr., Jeoloji Müh., İÜ

Orhan PEZEK, Kimyager

Ömer BAĞDATLI, İnşaat Teknikeri

Sabah YILMAZ, Prof. Dr., Jeoloji Müh., İÜ

Selahattin HASDEMİR, Dr., Jeoloji Müh.

Selman ER, Jeoloji Yük. Müh.

Serkan KÖKTÜRK, Kimyager

Süleyman DALGIÇ, Prof. Dr., Jeoloji Müh., İ

Şevki IŞIK, Teknisyen

Tamer GLDR, Teknisyen

Oktay YALÇINKAYA, Teknisyen, İT

Yasemin DEMİRCİ KILIÇ, Dr., Kimya Müh.

Yusuf ÖZTÜRK, Metalürji Müh.

Zeynep METİN, Kütüphaneci

Tez aşamasında iken yıllar önce yarıda bırakılmış bu çalışmanın tamamlanması, ısrarıyla beni yeniden başlamaya ikna eden ve çalışmanın her aşamasında fedakar desteğini esirgemeyen eşim Çiğdem DIĞIŞ sayesinde mümkün oldu, kendisine teşekkür ederim.

Dünyaya gelmemi ve yetişmemi sağlayan anne ve babamın anısına.

Mart, 2015

Aytaç DIĞIŞ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                     | Sayfa No |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                          | i        |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                  | vii      |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                 | ix       |
| SİMGE ve KISALTMA LİSTESİ .....                                                     | xi       |
| ÖZET.....                                                                           | xii      |
| SUMMARY .....                                                                       | xiv      |
| 1. GİRİŞ .....                                                                      | 1        |
| 2. GENEL KISIMLAR .....                                                             | 4        |
| 2.1. DOĞAL PUZOLANLAR .....                                                         | 4        |
| 2.2. DOĞAL ZEOLİTLER .....                                                          | 5        |
| 2.2.1. Zeolit Grubu Mineralleri.....                                                | 5        |
| 2.2.2. Zeolit Minerallerinin Kökeni .....                                           | 6        |
| 2.2.3. Zeolitlerin Oluşumu .....                                                    | 7        |
| 2.2.3.1. Mağmatik Zeolitler .....                                                   | 8        |
| 2.2.3.2. Sedimanter Zeolitler .....                                                 | 8        |
| 2.3. DOĞAL ZEOLİTİN GÜNCEL UYGULAMA ALANLARI.....                                   | 9        |
| 2.4. DOĞAL ZEOLİT REZERVLERİ ve ÜRETİMİ .....                                       | 10       |
| 2.5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                                        | 12       |
| 2.5.1. Doğal Zeolit Numunesi Alınan Sahaların Jeolojisi İle İlgili Çalışmalar ..... | 12       |
| 2.5.1.1. Kozaklı (Nevşehir) Bölgesi .....                                           | 12       |
| 2.5.1.2. Gördes (Manisa) Bölgesi .....                                              | 12       |
| 2.5.1.3. Bigadiç (Balıkesir) Bölgesi .....                                          | 12       |
| 2.5.1.4. Karamürsel (Yalova) Bölgesi .....                                          | 13       |
| 2.5.2. Araştırma Konusu İle İlgili Çalışmalar .....                                 | 14       |
| 3. MALZEME ve YÖNTEM.....                                                           | 19       |
| 3.1. MALZEME .....                                                                  | 19       |
| 3.1.1. Doğal Zeolit Numunelerinin Alındığı Bölgeler .....                           | 19       |
| 3.2. YÖNTEM .....                                                                   | 20       |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1. Ofis Çalışmaları .....                                                      | 20        |
| 3.2.2. Arazi Çalışmaları .....                                                     | 20        |
| 3.2.3. Laboratuvar Çalışmaları .....                                               | 20        |
| <b>4. BULGULAR .....</b>                                                           | <b>24</b> |
| 4.1. GENEL .....                                                                   | 24        |
| 4.2. NUMUNELERİN ALINDIĞI BÖLGELERİN JEOLJİSİ .....                                | 24        |
| 4.2.1. Nevşehir-Kozaklı Bölgesinin Jeolojisi .....                                 | 24        |
| 4.2.2. Manisa-Göğdes Bölgesinin Jeolojisi .....                                    | 26        |
| 4.2.3. Balıkesir-Bigadiç Bölgesinin Jeolojisi.....                                 | 30        |
| 4.2.4. Yalova- Sermayeci Bölgesinin Jeolojisi .....                                | 31        |
| 4.3. DOĞAL ZEOLİTLERİN TANIMLANMASI .....                                          | 34        |
| 4.3.1. Doğal Zeolit Numunelerinin Mineralojisi .....                               | 34        |
| 4.3.2. Doğal Zeolit Numunelerinin Petrografisi .....                               | 36        |
| 4.3.3. Doğal Zeolit Numunelerinin Kimyasal Özellikleri.....                        | 37        |
| 4.3.3.1. Yaş Analiz.....                                                           | 37        |
| 4.3.3.2. XRF Analizi .....                                                         | 39        |
| 4.3.3.3. Puzolanik Aktivite.....                                                   | 41        |
| 4.3.3.5. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Kızdırma Kaybı .....                             | 45        |
| 4.3.4. Fiziksel Deneyler .....                                                     | 46        |
| 4.3.4.1. Granüler Doğal Zeolitin Tane Büyüklüğü Dağılımı ve İnce Madde Oranı ..... | 46        |
| 4.3.4.2. Granüler Doğal Zeolitin Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı .....             | 47        |
| 4.3.4.3. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Kıvam Suyu.....                                  | 48        |
| 4.3.4.4. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Yoğunluk, Özgül Yüzey ve BET Değerleri ...       | 49        |
| 4.3.4.5. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Tane Büyüklüğü Dağılımı .....                    | 52        |
| 4.3.5. Öğütülmüş Doğal Zeolit Numunelerinin Mikro Yapısı.....                      | 54        |
| 4.4. ÖĞÜTÜLMÜŞ DOĞAL ZEOLİT KATKILI HARÇ DENEYLERİ .....                           | 59        |
| 4.4.1. Harçlarda Kullanılan Bileşenler.....                                        | 59        |
| 4.4.1.1. Portland Çimentosu .....                                                  | 59        |
| 4.4.1.2. Öğütülmüş Doğal Zeolit.....                                               | 60        |
| 4.4.1.3. Kum .....                                                                 | 62        |
| 4.4.1.4. Şebeke Suyu .....                                                         | 65        |
| 4.4.2. Deney Kapsamı ve Temel İlkeler .....                                        | 65        |

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.3. Harç Bileşiminin Belirlenmesi.....                                                                 | 66        |
| 4.4.4. Taze Harç Deneyleri .....                                                                          | 71        |
| 4.4.4.1. Öğütülmüş Doğal Zeolit Katkılı Çimento Hamurunda Kıvam Suyu ve Priz Tayini .....                 | 71        |
| 4.4.4.2. Yayılma.....                                                                                     | 72        |
| 4.4.4.3. Taze Harcın Birim Hacim Ağırlığı.....                                                            | 72        |
| 4.4.4.4. Hava İçeriği Tayini .....                                                                        | 73        |
| 4.4.5. Sertleşmiş Harç Deneyleri .....                                                                    | 74        |
| 4.4.5.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı Tayini .....                                                           | 74        |
| 4.4.6. Durabilite Deneyleri .....                                                                         | 76        |
| 4.4.6.1. Alkali-Silis Reaksiyonu Deneyi .....                                                             | 76        |
| 4.4.6.2. Sülfat Etkisi Deneyi .....                                                                       | 78        |
| 4.4.6.3. Klor İyonu Penetrasyonu Deneyi .....                                                             | 79        |
| 4.4.6.4. Kılcal ve Serbest Su Emme Deneyi .....                                                           | 81        |
| 4.4.7. Sertleşmiş Harç Numunelerinin Mikro Yapısı .....                                                   | 83        |
| 4.4.7.1. Harç Numunelerinin Polarizan Mikroskop İncelemesi .....                                          | 83        |
| 4.4.7.2. Harç Numunelerinin Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi.....                                  | 89        |
| <b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....</b>                                                                         | <b>93</b> |
| 5.1. TAZE HARÇ ÖZELİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....                                                       | 93        |
| 5.1.1. Kıvam Suyu ve Priz .....                                                                           | 93        |
| 5.1.2. Yayılma.....                                                                                       | 96        |
| 5.1.3. Birim Hacim Ağırlığı.....                                                                          | 97        |
| 5.1.4. Hava İçeriği.....                                                                                  | 98        |
| 5.2. SERTLEŞMİŞ HARÇ ÖZELİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....                                                | 99        |
| 5.2.1. Eğilme Dayanımı .....                                                                              | 99        |
| 5.2.2. Basınç Dayanımı.....                                                                               | 101       |
| 5.3. DURABİLİTE DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....                                                | 108       |
| 5.3.1. Alkali-Silis Reaksiyonu Deney Sonuçları .....                                                      | 108       |
| 5.3.2. Sülfat Etkisi Deney Sonuçları.....                                                                 | 111       |
| 5.3.3. Klor İyonu Penetrasyonu Deney Sonuçları .....                                                      | 114       |
| 5.3.4. Kılcal ve Serbest Su Emme Deney Sonuçları.....                                                     | 117       |
| 5.4. KARIŞIMLARDA KULLANILAN BAĞLAYICININ (Çimento+ÖDZ) ÇİMENTO STANDARDI YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 120       |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5. ÖDZ KATKISININ HARÇ ÖZELİKLERİNE ETKİSİNİN GENEL DEĞERLENDİRMESİ..... | 124        |
| 5.6. SONUÇLAR .....                                                        | 129        |
| 5.7. ÖNERİLER .....                                                        | 131        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                     | <b>133</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                       | <b>140</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3. 1: Doğal zeolit numunelerinin alındığı bölgeler.....                                                                                                 | 19 |
| Şekil 4. 1: Nevşehir-Kozaklı civarının jeoloji haritası.....                                                                                                  | 25 |
| Şekil 4. 2: Manisa-Gördes civarının jeoloji haritası .....                                                                                                    | 27 |
| Şekil 4. 3: DZ3 kodlu numunenin temin edildiği ocağın (Gördes-Manisa) genel görüntüsü.....                                                                    | 29 |
| Şekil 4. 4: DZ4 kodlu numunenin temin edildiği ocağın (Gördes-Manisa) genel görüntüsü.....                                                                    | 29 |
| Şekil 4. 5: Balıkesir-Bigadiç civarının jeoloji haritası.....                                                                                                 | 30 |
| Şekil 4. 6: DZ5 kodlu numunenin temin edildiği ocağın (Bigadiç-Balıkesir) genel görüntüsü. 32                                                                 |    |
| Şekil 4. 7: Yalova-Sermayeci Köyü civarının jeoloji haritası .....                                                                                            | 33 |
| Şekil 4. 8: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin BET-Puzolanik aktivite ilişkisi.....                                                                         | 43 |
| Şekil 4. 9: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine-Puzolanik aktivite ilişkisi.....                                                                      | 43 |
| Şekil 4. 10: Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis içeriği ve puzolanik aktivite ilişkisi. ....                                                            | 45 |
| Şekil 4. 11: Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis içeriği ve klinoptilolit oranı ilişkisi.....                                                            | 45 |
| Şekil 4. 12: Granüler doğal zeolit numunelerinin ağırlıkça su emme oranı ile öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin kıvam suyu ihtiyacı arasındaki ilişki ..... | 49 |
| Şekil 4. 13: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine ve BET değerleri arasındaki ilişki. 51                                                               |    |
| Şekil 4. 14: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin tane boyu dağılımı (lazer yöntemi ile).....                                                                 | 53 |
| Şekil 4. 15: DZ1 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 54 |
| Şekil 4. 16: DZ2 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 55 |
| Şekil 4. 17: DZ3 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 55 |
| Şekil 4. 18: DZ4 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 56 |
| Şekil 4. 19: DZ5 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 56 |
| Şekil 4. 20: DZ6 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 57 |
| Şekil 4. 21: DZ7 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 57 |
| Şekil 4. 22: DZ8 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 58 |
| Şekil 4. 23: DZ9 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.....                                                                                                  | 58 |
| Şekil 4. 24: Klor iyonu penetrasyonu deney düzeneği. ....                                                                                                     | 80 |
| Şekil 4. 25: ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri.....                                                                                       | 84 |
| Şekil 4. 26: ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri.....                                                                                       | 85 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4. 27:</b> ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri.....                                        | 86  |
| <b>Şekil 4. 28:</b> ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri.....                                        | 87  |
| <b>Şekil 4. 29:</b> ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri.....                                        | 88  |
| <b>Şekil 4. 30:</b> ÖDZ katkılı harçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. ....                              | 90  |
| <b>Şekil 4. 31:</b> ÖDZ katkılı harçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. ....                              | 91  |
| <b>Şekil 4. 32:</b> ÖDZ katkılı harçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. ....                              | 92  |
| <b>Şekil 5. 1:</b> Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine, BET ve kıvam suyu değerleri.....                      | 93  |
| <b>Şekil 5. 2:</b> Öğütülmüş doğal zeolit hamuru ve çimento+öğütülmüş doğal zeolit hamurunun kıvam suyu ihtiyacı..... | 94  |
| <b>Şekil 5. 3:</b> Öğütülmüş doğal zeolit katkılı çimento hamurunda kıvam suyu ve priz değerleri...                   | 95  |
| <b>Şekil 5. 4:</b> Seçilen öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine, BET ve yayılma değerleri...                   | 97  |
| <b>Şekil 5. 5:</b> Harçların taze birim hacim ağırlığı. ....                                                          | 98  |
| <b>Şekil 5. 6:</b> Yüksek dozlu seride üretilen harçların eğilme dayanımı karşılaştırması. ....                       | 100 |
| <b>Şekil 5. 7:</b> Düşük dozlu seride üretilen harçların eğilme dayanımı karşılaştırması.....                         | 101 |
| <b>Şekil 5. 8:</b> Yüksek dozlu seride üretilen harçların basınç dayanımı karşılaştırması.....                        | 102 |
| <b>Şekil 5. 9:</b> Düşük dozlu seride üretilen harçların basınç dayanımı karşılaştırması. ....                        | 103 |
| <b>Şekil 5. 10:</b> DD serisi harçların rölatif eğilme dayanımı ilişkisi. ....                                        | 104 |
| <b>Şekil 5. 11:</b> DD serisi harçların rölatif basınç dayanımı ilişkisi.....                                         | 105 |
| <b>Şekil 5. 12:</b> YD serisi harçların rölatif eğilme dayanımı ilişkisi. ....                                        | 106 |
| <b>Şekil 5. 13:</b> YD serisi harçların rölatif basınç dayanımı ilişkisi.....                                         | 107 |
| <b>Şekil 5. 14:</b> Harçların ASR genleşme oranı karşılaştırması.....                                                 | 109 |
| <b>Şekil 5. 15:</b> Harç prizmalarında sülfat etkisiyle genleşme oranı karşılaştırması. ....                          | 112 |
| <b>Şekil 5. 16:</b> Harç prizmalarının sülfat hasarı deneyi tamamlandıktan sonraki durumu.....                        | 113 |
| <b>Şekil 5. 17:</b> Harç numunelerinin klor difüzyonu karşılaştırması.....                                            | 115 |
| <b>Şekil 5. 18:</b> Yüksek dozlu serideki harçlarda kılcallık karşılaştırması.....                                    | 117 |
| <b>Şekil 5. 19:</b> Yüksek dozlu serideki harçlarda serbest su emme karşılaştırması.....                              | 118 |
| <b>Şekil 5. 20:</b> Düşük dozlu serideki harçlarda kılcallık karşılaştırması.....                                     | 118 |
| <b>Şekil 5. 21:</b> Düşük dozlu serideki harçlarda serbest su emme karşılaştırması. ....                              | 119 |
| <b>Şekil 5. 22:</b> Yüksek dozlu harçların genel rölatif performansı.....                                             | 128 |
| <b>Şekil 5. 23:</b> Düşük dozlu harçların genel rölatif performansı.....                                              | 128 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2. 1:</b> Türkiye’de tespit edilmiş olan zeolit yatakları ve türleri .....                                     | 11 |
| <b>Tablo 3. 1:</b> Türkiye’de doğal zeolit üretilen yerler. ....                                                        | 20 |
| <b>Tablo 3. 2:</b> Deney kapsamı ve referans standartlar .....                                                          | 22 |
| <b>Tablo 3. 3:</b> Granüler doğal zeolit tane boyu ve öğütülmüş doğal zeolit elek bakiyesi .....                        | 23 |
| <b>Tablo 4. 1:</b> Doğal zeolit numunelerine ait XRD analiz sonuçları.....                                              | 35 |
| <b>Tablo 4. 2:</b> Doğal zeolit numunelerinin petrografik özellikleri.....                                              | 36 |
| <b>Tablo 4. 3:</b> Doğal zeolit numuneleri üzerinde yapılan yaş analiz sonuçları.....                                   | 38 |
| <b>Tablo 4. 4:</b> Doğal puzolanların TS 25’te tanımlı kimyasal gereklere uygunluğu. ....                               | 39 |
| <b>Tablo 4. 5:</b> Doğal zeolit numuneleri üzerinde yapılan XRF analiz sonuçları. ....                                  | 40 |
| <b>Tablo 4. 6:</b> Doğal zeolit numuneleri üzerinde yapılan XRF analiz sonuçları .....                                  | 41 |
| <b>Tablo 4. 7:</b> Doğal zeolit numunelerinin puzolanik aktivitesi .....                                                | 42 |
| <b>Tablo 4. 8:</b> Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis içeriği. ....                                               | 44 |
| <b>Tablo 4. 9:</b> Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin kızdırma kaybı. ....                                            | 46 |
| <b>Tablo 4. 10:</b> Granüler doğal zeolit numunelerinin tane büyüklüğü dağılımı ve ince madde oranı.<br>.....           | 47 |
| <b>Tablo 4. 11:</b> Granüler doğal zeolit numunelerinin tane yoğunluğu ve su emme oranı. ....                           | 48 |
| <b>Tablo 4. 12:</b> Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin kıvam suyu değeri. ....                                        | 49 |
| <b>Tablo 4. 13:</b> Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin yoğunluk, Blaine ve BET değerleri.....                         | 50 |
| <b>Tablo 4. 14:</b> Deneylerde kullanılan CEM I 42.5R tipi çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik<br>özellikleri..... | 59 |
| <b>Tablo 4. 15:</b> Seçilen doğal zeolit numunelerinin genel özellikleri.....                                           | 62 |
| <b>Tablo 4. 16:</b> Deneylerde kullanılan TS EN 196-1’e uygun standart kumun özellikleri.....                           | 63 |
| <b>Tablo 4. 17:</b> ASR deneyinde kullanılan kumun özellikleri. ....                                                    | 64 |
| <b>Tablo 4. 18:</b> Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harç deneyleri. ....                                                 | 67 |
| <b>Tablo 4. 19:</b> Referans ve öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların bileşimi.....                                  | 70 |
| <b>Tablo 4. 20:</b> Referans harçların bileşimi. ....                                                                   | 71 |
| <b>Tablo 4. 21:</b> Öğütülmüş doğal zeolit katkılı çimento hamurunda kıvam suyu ve priz değerleri.<br>.....             | 71 |
| <b>Tablo 4. 22:</b> Harçların yayılma değerleri. ....                                                                   | 72 |

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 4. 23:</b> Harçların taze birim hacim ağırlığı. ....                                                                                              | 73  |
| <b>Tablo 4. 24:</b> Harçların hava içeriği. ....                                                                                                           | 74  |
| <b>Tablo 4. 25:</b> Yüksek dozlu harçların eğilme ve basınç dayanımı. ....                                                                                 | 75  |
| <b>Tablo 4. 26:</b> Düşük dozlu harçların eğilme ve basınç dayanımı ....                                                                                   | 75  |
| <b>Tablo 4. 27:</b> Alkali-silis reaksiyonu potansiyelinin ölçümünde kullanılan harç bileşimi. ....                                                        | 77  |
| <b>Tablo 4. 28:</b> Harçların alkali-silis reaksiyonu potansiyeli.....                                                                                     | 78  |
| <b>Tablo 4. 29:</b> Harç prizmalarında sülfat etkisiyle genleşme. ....                                                                                     | 79  |
| <b>Tablo 4. 30:</b> Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların klor difüzyonu. ....                                                                          | 81  |
| <b>Tablo 4. 31:</b> Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların kılcal ve serbest su emme değerleri. ....                                                     | 83  |
| <b>Tablo 5. 1:</b> Betondan geçen elektrik yükü-klor iyonu penetrasyonu ilişkisi.....                                                                      | 115 |
| <b>Tablo 5. 2:</b> TS EN 197-1/2002'ye göre genel çimentolar grubuna ait 27 ürün.....                                                                      | 121 |
| <b>Tablo 5. 3:</b> TS EN 197-1 standardına göre harç karışımlarındaki CEM I+Doğal Puzolan (ÖDZ) karışımına karşılık gelen çimento tipi.....                | 122 |
| <b>Tablo 5. 4:</b> CEN üyesi ülkelerin ulusal standartları tarafından sülfata dayanıklı çimento olarak kabul gören, EN 197-1: 2011'e uygun çimentolar..... | 123 |
| <b>Tablo 5. 5:</b> Portland puzolanlı çimentoların iç satıştaki payı.....                                                                                  | 124 |
| <b>Tablo 5. 6:</b> Harçların rölatif performans özeti (YD serisi).....                                                                                     | 126 |
| <b>Tablo 5. 7:</b> Harçların rölatif performans özeti (DD serisi).....                                                                                     | 127 |

## **SİMGE ve KISALTMA LİSTESİ**

### **Simgeler**

### **Açıklama**

**µm**

: Mikrometre

**nm**

: Nanometre

**MPa**

: Mega Pascal

**Q**

: Coulomb

### **Kısaltmalar**

### **Açıklama**

**ASR**

: Alkali silis reaksiyonu

**ASTM**

: American Society for Testing and Materials

**BET**

: Brunauer, Emmett, Teller

**BS**

: British Standard

**DD**

: Düşük dozlu

**DZ**

: Doğal zeolit

**EN**

: European Norm

**ÖDZ**

: Öğütülmüş doğal zeolit

**S/Ç**

: Su/Çimento Oranı

**TÇMB**

: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

**TS**

: Türk Standardı

**XRD**

: X-ray diffraction

**XRF**

: X-ray fluorescence

**USGS**

: Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Dairesi

**YD**

: Yüksek dozlu

## **ÖZET**

### **DOKTORA TEZİ**

#### **MİNERAL KATKI OLARAK KULLANILAN ÖĞÜTÜLMÜŞ DOĞAL ZEOLİTİN HARÇ ÖZELİKLERİNE ETKİSİ**

**Aytaç DIĞIŞ**

**İstanbul Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Atiye TUĞRUL**

Mineral katkıların çimento endüstrisinde kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu gerçeğin ardında iki temel neden bulunmaktadır. Üretim prosesi sırasında açığa çıkan karbon dioksit emisyonu nedeniyle çimento endüstrisinin maruz kaldığı çevre ve sürdürülebilirlik baskıları ile mineral katkıların çimento ve/veya beton bileşimine dahil edilmesiyle kazanılan teknik üstünlükler.

TS EN 197-1 çimento standardında ayrıntılı tanımlanmış bir bileşen olarak, ülkemizde yaygın bulunan doğal puzolan kaynakları uzun yıllardır katkılı çimento üretiminde ve son yıllarda da beton üretiminde mineral katkı olarak kullanılmaktadır. Puzolanik çimentoların başta beton olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesinin beklentilerine cevap verebilmesi için, katkılı çimentolarla hazırlanan betonların durabilite performansının ayrıntılı deneylerle ortaya koyulması gerekmektedir.

Doktora tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, zeolitik bileşimli doğal puzolanların belirli bir inceliğe getirildikten sonra çimento ve beton üretimi sırasında mineral katkı olarak kullanılması durumunda elde edilecek teknik üstünlüklerin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Numune çeşitliliği sağlamak amacıyla, Türkiye’de faal halde bulunan üreticilerin tamamından granüler doğal zeolit numuneleri temin edilmiştir. Bu numunelerin karakterizasyonu yapıldıktan sonra ise seçilen üç adet numune ile ayrıntılı harç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyler kapsamında, TS EN 197-1’e uygun CEM I çimentosuna değişik oranda öğütülmüş doğal zeolit ikame ederek hazırlanmış harçlarda eğilme ve basınç dayanımı gelişimi, sülfat direnci, klor iyonu penetrasyonuna direnç, alkali-silis reaksiyonu ve su emme performansları, referans bileşimli harcınkiyle kıyaslanmıştır. Ayrıca, üretilen harçların polarizan mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu bulguları da incelenmiştir.

Harç numuneleri üzerinde yürütülen deney sonuçları incelendiğinde, CEM I çimentosuna ikame edilen öğütülmüş doğal zeolit katkısı ile, harçların kıvam ve erken dayanımında gerileme (kimyasal katkılarla telafisi mümkün), nihai dayanımında artış ve ikame oranı parametre bazında farklılıklar sergilemekle birlikte genel olarak durabilite performansında büyük ölçüde iyileşme davranışı ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Ülkemizde yaygın olarak bulunan doğal zeolit kaynaklarının çimento ve beton üretiminde daha büyük oranda kullanılma potansiyeli mevcuttur.

Mart 2015, 155 sayfa

**Anahtar kelimeler:** Doğal zeolit, çimento harcı, dayanım, durabilite.

## **SUMMARY**

**Ph.D. THESIS**

**THE EFFECTS OF GROUND NATURAL ZEOLITE  
AS A MINERAL ADDITIVE  
ON MORTAR PROPERTIES**

**Aytaç DIĞIŞ**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Science and Engineering**

**Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Atiye TUĞRUL**

Usage of mineral additives in cement production process is continuously increasing. The motive behind this fact is two fold: Environmental and sustainability concerns related to carbon dioxide emitted into the atmosphere during cement production and technical advantages from mineral additions into cement and/or concrete composition.

Being one of the mineral additives described in detail by the cement standard TS EN 197-1, abundant natural pozzolana resources in Turkey have been being used for cement production for long years and even as an addition into concrete lately. In order to comply with the requirements of a wide range of applications-most commonly concrete, durability performance of concretes with pozzolana blended cement binders needs to be proved with comprehensive testing.

This study, which is prepared as PhD thesis, targets investigating technical advantages of finely ground natural zeolites used as mineral addition in cement or concrete mixes.

In order to examine a wide range of samples, initially granular natural zeolite samples have been provided from all active manufacturers in Turkey. Following the characterization of the zeolites, the three selected samples have been used as an addition in mortar mixes during the second phase of the study.

The scope of testing covers tensile and compressive strength development, sulphate resistance, chloride ion penetration, alkali-silica reaction and water absorbtion properties of mortars prepared with a mixture of TS EN 197-1 compliant CEM I cement and ground natural zeolite (with different addition rates) as binder and the comparison of the results with the performance of the reference mortar. In addition, polarized microscope and scanning electron microscope findings have been evaluated.

According to the results obtained from mortar samples prepared with CEM I substituted ground natural zeolite, it has been observed that workability and early strength properties decline (which can be compensated with admixtures), while final strength and durability properties exhibit significant improvement (dependant on the addition rate). Abundant resources of natural zeolite in our country have a higher potential for being used as a mineral addition by both cement and concrete industries.

March 2015, 155 pages.

**Keywords:** Natural zeolite, cement mortar, strength, durability.

## 1. GİRİŞ

Günümüz çimento üretim teknolojisi, her bir ton klinker üretimi için 0.83-0.85ton mertebesinde CO<sub>2</sub> emisyonu (hammaddenin dekarbonasyonu ve fosil yakıt kaynaklı) gerçeğiyle karşı karşıya bulunmaktadır. Dolayısıyla, Portland çimentosu (saf çimento) üretimi için de atmosfere ton başına aynı mertebede bir CO<sub>2</sub> salımı söz konusudur. Ancak aynı miktarda klinkerden, mineral katkıları kullanmak yoluyla (bir başka ifadeyle klinkeri mineral katkılarıyla seyrelterek), saf Portland çimentosundan daha fazla miktarda katkılı çimento elde etmek mümkün olabilmektedir.

Küresel ısınma ve iklim değişikliği konularında, uluslararası platformda (devletlerin gözetiminde ve Birleşmiş Milletler şemsiyesi altında) yapılması gerekenleri ortaya koyan Kyoto Protokolü 2005 yılında yürürlüğe girmiş durumdadır. Bu protokol temelinde, karbon dioksit ve sera etkisine neden olan diğer gazların (su buharı, metan, azot oksit ve ozon) atmosfere salımının, imzalayan ülkeler tarafından, gerektiğinde cezai yaptırımları da devreye alarak, belli vadelerde belli seviyelere düşürülmesi ilkesi üzerine kurulmuştur. Kyoto Protokolü'nün I. Taaahhüt Dönemi'nde (2008-2012) 37 ülke sera gazı azaltımı ve/veya sınırlaması konusunda "hukuki olarak bağlayıcı" taahhütler vermiştir. 2012 yılı iklim konferansı kapsamında kabul edilen ek ile Kyoto Protokolü II. Taahhüt Dönemi (2013-2020) yürürlüğe girmiştir. Bu protokol çerçevesinde, özellikle gelişmiş ülkelerde çimento sektörü de sorumluluğunu kabul ederek CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar temelinde üç başlık altında yürütülmektedir:

- Termal ve elektrik enerji verimliliği,
- Alternatif yakıt (özellikle biyokütle atıkları) kullanımının artırılması,
- Klinker katkı malzemelerinin kullanımının artırılması.

Avrupa'da ve ülkemizde yürürlükte bulunan çimento standardında (EN 197-1 Cement : Composition, specifications and conformity criteria for common cements), 5 ana çimento tipinden biri Portland çimentolarını (CEM I), diğer dördü ise (CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V) katkılı çimentoları tanımlamaktadır. Özellikleri standartta tarif edilmiş mineral katkıları, bir yandan çevreyle dost bir çimento üretim sürecine imkan

tanırken, öte yandan çoğu katkıların (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, mikrosilis ve doğal puzolanlar) çimentolu uygulamalarda zararlı ortam etkilerine dayanıklılık (durabilite) bakımından da önemli yararlar sağladığı uzun zamandır bilinmekte ve bu katkılar çimento ve/veya beton üretimi sırasında katılmak suretiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Çelik endüstrisinin atığı yüksek fırın cürufu ve termik santrallerin atığı uçucu kül kaynaklarına ilave olarak, ülkemizin yaygın kireçtaşı ve doğal puzolan kaynakları da çimento üretimi için cazip seçenekler oluşturmakta ve çimento sektörü tarafından uzun yıllardır değerlendirilmektedir.

Avrupa’da ve ülkemizde yürürlükte bulunan bir başka standart da çimentonun en yaygın tüketim alanı, kompozit yapı malzemesi betonu tanımlamaktadır (EN 206-1 Concrete: Specification, performance, production and conformity). Teknik şartnameler, ekonomik ömür açısından konutlar için 50 yıl, büyük mühendislik yapıları için ise 100 yıllık bir hizmet dönemi öngörmekte ve değişik çevre etkilerine maruz beton/betonarme yapılar/yapı elemanları için bu hizmet ömrünün elde edilebilmesini mümkün kılacak beton tasarımı tedbirleri ile ilgili öneriler sunmaktadır. Birçok Avrupa ülkesinde, uygulamanın maruz kalacağı etkilerin inşa süreci başlamadan tesbiti ve betona zarar verici çevre etkilerinin söz konusu olduğu uygulamalarda, başta kullanılacak çimento tipi, formüldeki en düşük çimento miktarı ve en yüksek S/Ç (su/çimento) oranı olmak üzere standartlarda beton bileşimi ile ilgili bazı sınırlamalar söz konusudur.

Bu noktada, global olarak çimento endüstrisinde bir yandan çevre baskıları/kaygıları nedeniyle katkılı çimento üretiminin daha fazla önem ve yaygınlık kazandığı bir süreç devam ederken, öte yandan çimento/beton içerisindeki mineral katkının cinsi ve miktarı ile ilişkili olarak, beton durabilitesi açısından farklı etki sınıflarına uygunluk şartının somut bir şekilde ortaya koyulması konusu (hedeflenen durabilite performansına ulaşılabilmesi) öne çıkmaktadır.

Ülkemizde yaygın bulunan doğal puzolan kaynaklarının çimento ve/veya beton üretiminde mineral katkı olarak kullanılması da, bu çimentoların başta beton olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesinin beklentilerine cevap verebilmesi için, değişik cins ve miktarda katılmasıyla üretilmiş katkılı çimentolarla hazırlanan betonların

durabilite performansının ayrıntılı deneylerle ortaya koyulmasını gerektirmektedir. Çalışma konusu, yukarıda özetlenen konjonktürel durum analiz edilerek seçilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de büyük bir rezerve sahip doğal zeolit mineralinin, öğütülerek belirli bir inceliğe getirildikten sonra çimento ve beton üretimi sırasında mineral katkı olarak kullanılması durumunda elde edilebilecek teknik üstünlükleri ortaya koymaktır. Doğal zeolitlerin ayrıntılı incelenmesi yoluyla, TS EN 197-1 çimento standardındaki “doğal puzolan” genel tanımı içerisine dahil olan bu mineral grubunun harç ve betondaki davranışı üzerinde daha kapsamlı bilgi edinilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında Türkiye’de hali hazırda faal halde bulunan doğal zeolit ocaklarından temin edilen numunelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Daha sonra bu numuneler arasından seçilen 3 farklı doğal zeolit öğütülerek, doz ve S/Ç oranları farklı iki ayrı bileşimde çimento harcı içerisinde Portland çimentosuna ikame mineral katkı olarak kullanılmıştır. Doğal zeolitinin harcın fiziksel, mekanik, durabilite özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkileri Portland çimentolu referans harçla kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. DOĞAL PUZOLANLAR

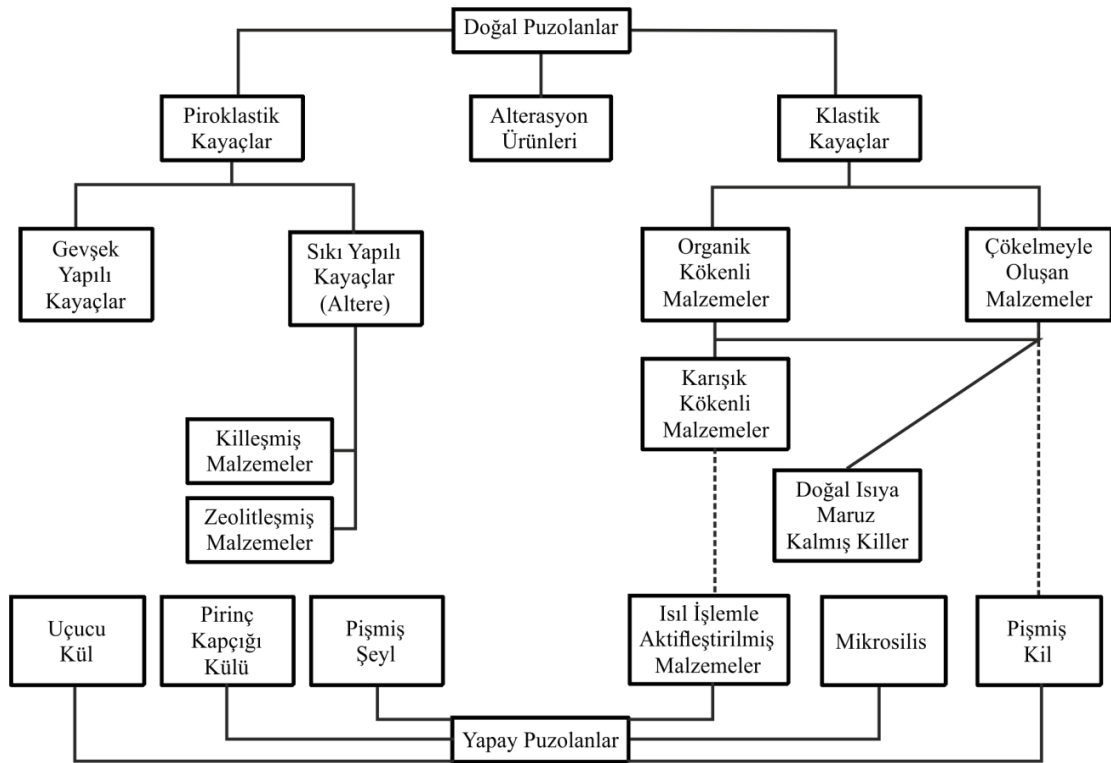
Çimento ve beton uygulamalarında puzolan kelimesi başlıca iki anlamda kullanılmaktadır. Bunların birincisi Pozzouli veya Roma (İtalya) civarında bulunan, özellikle camsı ve bazen de zeolitik yapıli piroklastik kayaçları tarif eder. İkinci kullanımında ise, kendi başına suyla karıştırıldığında bağlayıcılık özeliği taşımayan, buna karşılık ince öğütölmüş halde ve sulu ortamda, normal sıcaklık koşulları altında, çimento hidratasyonu sonucunda açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerek dayanım gelişimine katkı sağlayan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri oluşturan, çoğunlukla silisli veya silisli-alüminli doğal inorganik maddeleri ifade etmektedir. Doğal puzolanlar köken, bileşim ve yapı bakımından çok geniş bir malzeme grubunu kapsamaktadır (Hewlett, 2008). Ülkemizde özellikle çimento sektöründe, doğal puzolan yerine tras terimi de sıklıkla kullanılmaktadır.

Puzolan teriminin kimyasal bileşim, mineralojik özellikler ve jeolojik köken bakımından çok farklı malzemeleri kapsaması, kireç ve suyla karıştırıldığında sertleşme davranışı sergilemek gibi bir ortak paydası olan puzolanlara yönelik tam bir sınıflandırma ortaya koyulabilmesini zorlaştırmıştır (Hewlett, 2008). Massazza (1976) tarafından yapılmış doğal ve suni puzolanları kapsayan sınıflandırma Şekil 2.1’de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen doğal zeolit numunelerini de kapsayan piroklastik kayaçlar, erimiş magmanın volkanizma sırasında küçük parçacıklar halinde yeryüzüne püskürmesi yoluyla oluşur (Hewlett, 2008).

Püskürme sırasında meydana gelen ani basınç düşüşü, sıvı magma içerisinde çözünmüş halde bulunan gazların açığa çıkmasına yol açar ve sonuçta her magma parçacığına mikroporoz bir yapı kazandıran mikroskopik gözenekler oluşur. Eş zamanlı olarak, magma parçacıkları camsı yapıya kavuşmalarına neden olan bir soğuma sürecine de maruz kalır. Püsküren malzeme karada veya su altında çökebilir (Hewlett, 2008).

Volkanik puzolan yatakları genellikle, ayrılmış ve sonradan diyajenez veya diğer doğal süreçler neticesinde çimentolanmış sıkı katmanlar (tüf katmanları) ile birlikte görülür. Ayrışma sonucunda zeolitik veya arjillik bir yapı oluşabilir ve bu da camsı yapıdaki puzolanın zeolit veya kil minerallerine dönüşmesine yol açabilir. Orijinal oluşumda ortaya çıkan bu dönüşümün mertebesi diyajenezin şiddetine ve süresine bağlıdır. Zeolitlenme puzolanik özellikleri geliştirirken, arjilleşme ise azaltıcı yönde bir etki yapar (Hewlett, 2008).



Şekik 2. 1: Puzolanların sınıflandırması (Massazza, 1976).

## 2.2. DOĞAL ZEOLİTLER

### 2.2.1. Zeolit Grubu Mineralleri

Zeolit grubu mineralleri özellikle sodyum, potasyum, magnezyum, kalsiyum, stronsiyum ve baryum elementlerinden oluşan kristalli alüminosilikat hidratlarıdır. Yapı olarak zeolitler sınırsız uzantılı ve üç buutlu  $AlO_4$  ve  $SiO_4$  tetrahederlerinin oksijenleri paylaşarak birbirine bağlandığı alüminosilikat çerçevelerinden ibarettir.

Zeolitler ilk olarak İsveçli mineralog Cronstedt (1756) tarafından stilbit mineralinin bulunması ile hidrate alüminosilikatlardan oluşan yeni bir mineral grubu olarak tanımlanmıştır. Mineral alevle ısıtıldığında genleşme davranışı sergilediği için Cronstedt (1756) Yunanca ‘‘kabarmak (intumescence)’’ ve ‘‘taş’’ kelimelerinden türeme zeolit adını uygun görmüştür.

Zeolitler çerçeve yapılı alüminosilikat minerallerinin en geniş grubunu oluşturur. Yapılan çalışmalarla 35’i aşkın doğal ve 100’ün üzerinde sentetik zeolit türü tanımlanmıştır (Breck, 1974). Zeolitler alüminosilikat çerçevelerinin temel özelliklerine göre sınıflandırılır. Bu özellikler:

- Yüksek derecede hidrasyon ve zeolitik su davranışı göstermesi,
- Su kaybettiğinde düşük yoğunluk ve yüksek boşluk hacmi sergilemesi,
- Su kaybettiğinde ve kristaller %50’ye varan boşluk oranına eriştiğinde bile kristal yapısını koruması,
- Katyon değişimi özeliği,
- Su kaybetmiş kristallerin üniform moleküler kanallar içermesi,
- Elektrik iletkenliği de dahil olmak üzere çeşitli fiziksel özellikleri,
- Gaz ve buharı adsorbe etme kabiliyeti,
- Katalitik özellik.

Zeolit minerallerinin yapısı ve özellikleri (adsorbsiyon, iyon değişimi vs.) ile ilgili sayısız çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar zeolitlerle ilgili bugünkü bilgi seviyesine önemli katkılar sağlamıştır. Zeolit minerallerinin sınıflanması, oluşumu, formasyonu ve özelliklerinin ortaya koyulması büyük önem taşımaktadır. X-ray kristalografi analizinin gelişmesi, daha önceleri minerallerin kimyasal bileşimi, optik özellikleri ve morfolojisi gibi unsurlara dayalı olarak yapılmış sınıflamaların daha net bir şekilde tanımlanabilmesine imkan tanımıştır (Breck, 1974).

### **2.2.2. Zeolit Minerallerinin Kökeni**

Hay (1966) zeolit içeren sedimanter kayaların mineralojik bileşimi ile ana kayacın kimyasal bileşimi, çökelme ve çökelme sonrası ortamın su kimyası, yaş ve derinlik arasında bir korelasyon kurmaya çalışmıştır. Deniz ve tatlı su fasiyeslerinde volkanik küllerin alterasyon ürünü halinde oluşmuş ve derinde bulunmayan zeolitlerde kimyasal

korelasyon daha yüksektir. Klinoptilolit gibi yüksek silisli ve alkalice zengin zeolitler yüksek silisli kayalarda hakimken, fillipsit ve analsim gibi düşük silis içeren zeolitler daha bazik veya düşük silisli kayalarda görülür.

Mineral içeriği bir ölçüde pH, suyun tuzluluğu ve içinde çözülmüş iyonların bileşimi gibi çökeltme anındaki ortam şartlarına bağlıdır. Mesela pH, zeolitlenme reaksiyonlarının sürati ve oluşan minerallerin türleri üzerinde etkilidir. Su pH'sinin 7,5-8,1 arasında olduğu denizel ortamda, silisik cam alterasyona uğramadan milyonlarca yıl korunabilmektedir. Daha bazik olan sodyum-karbonat göl ortamında, 9,1-9,9pH civarında, alterasyon birkaç on bin yıl içerisinde ortaya çıkmaktadır. Sudaki tuz içeriği de volkanik camdan zeolit oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Breck, 1974).

Zeolit minerallerinin düşey zonlanması (kalın denizel ve tatlı su istiflerinde görüldüğü haliyle) genel olarak daha sulu ve düşük yoğunluklu zeolitlerin yüzeye yakın bulunması şeklindedir. Örtü kalınlığı arttıkça, zeolitlerin yerini feldspat gibi susuz silikatlardan oluşan mineraller alır. Genel olarak sulu ve silisçe zengin zeolitler yüzeye yakın, buna karşılık en az su içeren ve düşük silisli olanlar derinde bulunur. Denizel ve tatlı su fasiyesindeki kalın volkanik tüf istiflerinde, en üst kesim (3000-9000m) ayrışmamış camdan oluşur ve pek zeolit içermez. Cam zonunun hemen altında yer alan zeolitik kayalar içerisinde mordenit ve klinoptilolit karakteristiktir. Derinlik arttıkça analsim ve ardından laumontit görülür. Örtü tabakasının sığ olduğu kayalarda analsimin klinoptilolit, mordenit, eriyonit ve fillipsit minerallerine oranı sedimanter kayacın yaşı ile ilişkili olarak artar (Breck, 1974).

### 2.2.3. Zeolitlerin Oluşumu

İçerisinde zeolit bulunan mineral kombinasyonları çok çeşitlidir ve bu nedenle bir "zeolit fasiyesi" tanımı ortaya çıkmıştır. Önceleri zeolit minerallerinin bazaltik ve volkanik kayaların boşluklarında oluştuğu tezi kabul görmüştü (1756 yılında Cronstedt tarafından stilbit mineralinin bulunması sonrasında). Zeolit minerallerinin sedimanter birimler içerisinde ve ayrıca volkanik kül ve diğer piroklastik malzemelerin alterasyon ürünü olarak meydana geldiği de ileri sürülmüştür. X-ray difraksiyon yöntemi ile çok ince taneli mikroskopik malzemelerin incelenebilmesi imkanı, bazı zeolit türlerinin

alkalin ortamda bulunan volkanik küllerin diyajenezi sırasında oluştuğunu ortaya koymuştur (Breck, 1974).

Bazı zeolit türlerinin (laumontit ve heulandit) oluşumunda suyun CO<sub>2</sub>'e bağlı kimyasal potansiyeli, su sıcaklığı ve basıncın da etkisi bulunmaktadır. Diyajenezin ilk evrelerinde zeolit oluşumu volkanik camın devitrifikasyonu, suyun aşırı tuzluluğu ve düşük çökelme hızı tarafından da desteklenmektedir (Breck, 1974).

Zeolit minerallerinin çoğunluğu mağmatik kayalar içerisinde bulunmakla birlikte, sedimanter çökeltiler içerisinde görülen türler de mevcuttur (Breck, 1974).

#### **2.2.3.1. Mağmatik Zeolitler**

Mağmatik zeolitler bazen çapı 2,5cm'yi bulan iyi gelişmiş kristaller halinde oluşur. Bazalt kütlesi içerisindeki çatlak boşlukları boyunca, mağmatik aktivitenin son evresindeki sulu solüsyonlardan kristallendikleri ileri sürülmektedir. Boşlukların çoğunda ard arda farklı zeolit türlerinin geliştiği ve bu minerallerin genellikle kalsit, kalsiyum karbonat, kuvars ve diğer sulu minerallerle birlikte bulunduğu görülür. Zeolitlerin oluşum ve ortam korelasyonunu ortaya koyabilmek için, zeolit minerallerinin silis içeriği ve serbest silis miktarı ilişkisine göre dağılımı değerlendirilir. Kuvars içeren kayaların damarlarında bulunan tipik zeolit türleri stilbit, heulandit, laumontit ve analsimdir (Breck, 1974).

#### **2.2.3.2. Sedimanter Zeolitler**

Sedimanter kayalar içerisinde görülen zeolit çeşitleri analsim, klinoptilolit, mordenit, fillipsit, eriyonit, laumontit, şabazit, wairakit ve ferrierittir. Hay (1966) sedimanter kayalar içerisinde bulunan zeolitleri çökelme ortamı bakımından iki gruba ayırır:

1. Tuzlu, alkalin, denizel olmayan yataklar: Zeolitler geniş yayımlı ve nispeten saf yapıdadır,
2. Tatlısu ve denizel yataklar: Zeolitler kalın katmanlı tüflü çökeltiler içinde volkanik camın alterasyon ürünü olarak bulunur.

Bazı yatakların bu iki kategoriye dahil edilmesinde güçlük olabilir. Her durumda zeolitik reaksiyonların ortak bir yönü bulunsa da, temel fark yüksek pH (9,4 civarı) ile ilişkilidir. Bu da tuzlu göller için olağan bir durumdur.

Özellikle analsim ve klinoptilolit, volkanik kül ve diğer piroklastik malzemenin alterasyon ürünü ve bentonit içindeki ana kütle olarak değerlendirilmiştir. Volkanik camın alterasyonu sonucunda mordenit de oluşur (Breck, 1974).

### 2.3. DOĞAL ZEOLİTİN GÜNCEL UYGULAMA ALANLARI

Doğal zeolitin başlıca dört fonksiyonel özeliği çok çeşitli alanlarda kullanılabilmesine imkan tanımaktadır (Kocakuşak ve diğ., 2001).

- Gaz adsorbsiyonu
  - o Koku giderme ve kontrol
  - o Endüstriyel gaz separasyonu
- Su adsorbsiyonu / desorbsiyonu
  - o Isı depolama ve solar soğutma
  - o Desikant (kurutma) uygulamaları
  - o Tarım ve hayvancılık
- İyon değiştirme özeliği
  - o Su arıtma ve hazırlama
  - o Su işletmeciliği
  - o Tarım ve hayvancılık
- Katalitik özeliği
  - o Reaksiyon mühendisliği, üretim ve arıtım

Yukarıda sıralanan özellikleri nedeniyle günümüzde doğal zeolitler aşağıda sıralanan alanlarda kullanılmaktadır (Kocakuşak ve diğ., 2001):

- Endüstriyel tip adsorbanlar
- Puzolanik çimento ve yapı malzemeleri
- Toksik atıkların tutulması

- Büyükbaş ve küçükbaş hayvan ağıllarının temiz ve sağlıklı tutulması (koku ve nem kontrolü)
- Golf, futbol vb. çim sahaların oluşturulması, bakımı ve üstün kaliteli olmasının sağlanması
- Park vb. alanların ıslahı ve kalitesinin artırılması
- Kültür balıkçılığı ve havuzlarının işletilmesi
- Atık su ve kullanım suyu arıtımı
- Ağır metallerin toprak ve sudan uzaklaştırılması
- Hava ve su filtrasyonu
- Radyoaktif iyonların atıklardan temizlenmesi
- Seçici gaz adsorbsiyonu ile doğalgaz ve metanın SO<sub>2</sub> gibi istenmeyen gazlardan temizlenmesi ve zenginleştirilmesi
- Havadaki azotun tutulması yoluyla havuzların havalandırılmasında oksijence zengin hava elde edilmesi
- Koku kontrolü ve giderilmesi
- Hayvan yemi katkısı

Görüldüğü üzere doğal zeolitlerden çok geniş bir alanda yararlanma imkanı bulunmaktadır .

## 2.4. DOĞAL ZEOLİT REZERVLERİ ve ÜRETİMİ

Dünya doğal zeolit rezervlerini kesin rakamlarla ifade edebilmek mümkün görünmemektedir. Bununla beraber öngörülen rezerv 100 milyar tonun üzerindedir.

T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007) verilerine göre, Türkiye madenlerinin zenginlik sınıflandırması kapsamında zeolit rezervleri ‘‘çok zengin’’ kategorisine dahildir ve toplam rezerv (görünür+muhtemel, klinoptilolit+heulandit) 345 milyon ton mertebesinde raporlanmıştır. Ülkemizdeki doğal zeolit kaynaklarının konumu Şekil 2.2’de gösterilmektedir.

Köktürk ve Yılmaz (1999) Türkiye’de tespit edilmiş doğal zeolit yatakları ve mineral türlerini tanımlamıştır (Tablo 2.1).

USGS (Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Dairesi) 2013 yılı tahmini verilerine göre, dünyada zeolit üretimi 2,7 milyon ton/yıl mertebesinde. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Maden İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2011 yılı verilerine göre, Türkiye'nin üretimi ise 214 bin ton/yıl civarındadır.



Şekil 2.2: Türkiye'deki doğal zeolit yataklarının konumu (www.mta.gov.tr, 2013).

Tablo 2.1: Türkiye'de tespit edilmiş olan zeolit yatakları ve türleri (Köktürk ve Yılmaz, 1999).

| Zeolit Yatakları                          | Türleri                                    |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Bahçecik, Gölpazarı, Göynük               | Analsim                                    |
| Polatlı, Mülk, Oğlakçı, Ayaş              | Analsim                                    |
| Nallıhan, Çayırhan, Beypazarı, Mihaliççik | Analsim                                    |
| Kalecik, Çandır, Şabanözü, Hasayaz        | Analsim                                    |
| Balıkesir-Bigadiç                         | Klinoptilolit                              |
| Emet-Yukarı Yoncağağaç                    | Klinoptilolit                              |
| Kütahya-Şaphane                           | Klinoptilolit                              |
| Geniz, Hisarcık                           | Klinoptilolit                              |
| Gördes                                    | Klinoptilolit                              |
| İzmir-Urla                                | Klinoptilolit                              |
| Kapadokya yöresi (Tuzköy-Karain)          | Klinoptilolit, şabazit, mordenit, eriyonit |

Çin'de çimento içerisinde kullanılan doğal zeolitinin yıllık tüketimi 30 milyon ton mertebesinde ifade edilmektedir (Ahmadi ve Shekarchi, 2010; Feng ve Peng, 2005; Poon ve diğ., 1999).

## 2.5. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Önceki çalışmalar numune alınan sahaların jeolojisi ve araştırma konusu ile ilgili olmak üzere iki bölüm halinde sunulmuştur.

### 2.5.1. Doğal Zeolit Numunesi Alınan Sahaların Jeolojisi İle İlgili Çalışmalar

#### 2.5.1.1. Kozaklı (Nevşehir) Bölgesi

**Kara (1997);** Kozaklı civarının yaşlıdan gence doğru Oligo-Miyosen yaşlı Deliceirmak formasyonu, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Kozaklı kireçtaşı ve Mucur tüfleri, Pliyosen yaşlı Kızılırmak formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlardan oluştuğunu belirtmiştir. Kalınlığı 1-5m arasında değişen Mucur tüfleri, yatay konumlu bant ve mercekler şeklinde konumlanan, beyaz, pembe renkli volkanik cam parçalı yumuşak masif volkanikler olarak tanımlanmıştır. Yer yer bentonitleşmiş haldeki birim, Kayseri-Nevşehir volkanizmasından taşınan küllerden oluşmuştur.

#### 2.5.1.2. Gördes (Manisa) Bölgesi

**Esenli ve Özpeker (1993);** Gördes yakın çevresinde, maksimum 1000m'yi bulan kalınlıktaki Neojen çökel istifin, Menderes Masifi kristalen kayaları ve İzmir-Ankara zonunun ofiyolit topluluğuna ait kaya birimleri üzerinde uyumsuz olarak, altta kaba ve ince taneli, birbirleriyle yanal ve düşey geçişli birimler ile bunların üzerinde volkanik ve klastiklerden oluşan göl çökellerinden ibaret olduğunu ortaya koymuştur.

#### 2.5.1.3. Bigadiç (Balıkesir) Bölgesi

**Candan ve diğ. (2001), Dora ve diğ. (2001), Koralay ve diğ. (2001, 2004);** Batı Anadolu'da geniş alanlarda yüzlek veren Menderes Masifi'nin KD-GB uzanımlı, elips görünümde olup, kuzeybatı'da Bornova fliş zonu, kuzeyde Afyon zonu ve güneyde ise Likya Napları tarafından tektonik olarak üzerlendiğini belirtmiştir. Yaklaşık D-B uzanımlı yapısal grabenler (Büyük Menderes ve Gediz Grabenleri vb.) masifi kuzey (Gördes as masifi), merkez (Ödemiş-Kiraz as masifi) ve güney (Çine as masifi) olmak üzere üç as masife ayırmıştır.

**Dora ve diğ. (1995), Bozkurt ve Park (1994), Bozkurt ve Oberhänsli (2001), Erdoğan ve Güngör (2004);** Prekambriyen yaşlı bir masif çekirdek ile çekirdeği

yapısal olarak üzerleyen Paleozoyik-Senozoyik yaşlı örtü birimlerinden oluştuğunu belirtmiştir.

**Bozkurt ve Oberhänsli (2001), Candan ve diğ. (2001);** çekirdek istifin, metamorfizma yaşı 50 milyon yıldan fazla olan gözlü gnays, metagranit, yüksek dereceli şist ve eklojitik metagabroları kapsadığını belirtmiştir.

**Erdoğan (1990), Erdoğan ve diğ. (1990), Okay ve Siyako (1993), Okay ve Tüysüz (1999);** Bornova fliş zonunun 50-90 km genişliğinde, Üst Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı yoğun deformasyon geçirmiş kırıntılı (grovak ve şeyl) bir hamur içinde yer alan değişik kaya (Mesozoyik neritik kireçtaşı ve mafik kayaç) blok ve dilimlerinden oluştuğunu belirtmiştir.

**Ercan (1983);** çalışma alanında, Tersiyer başlarında (muhtemelen Paleosen'de) Menderes masifinin yükselmesi ile Simav grabeninin kırık sistemlerinin gelişmeye başladığını, granit intruzyonlarının da yerleşimlerini sürdürdüğünü belirtmiştir.

**Yağmurlu ve Baykal (1989);** bölgede egemen olarak bazik lav, tuf ve aglomera şeklindeki volkanik türevler ile bunlarla arakatkılı olabilen katmanlı çört, çörtlü kireçtaşı ile kırmızımsı şeyl bileşenlerinden ve çok farklı bileşenli bloklardan yapıldığını belirtmiştir.

#### **2.5.1.4. Karamürsel (Yalova) Bölgesi**

**Akartuna (1968);** Volkanizmanın alttaki fliş özeliğinde çökeller üzerinde tüflü seviyelerle başladığını ve bunların üzerine lav, tuf ve aglomeraların geldiğini tespit etmiş ve Paleosen-Eosen yaşlı olduklarını belirtmiştir.

**Erendil ve diğ. (1991);** Yalova bölgesi volkaniklerini Sarısu volkanikleri olarak adlandırmışlardır. Bu volkanikler genelde andezitik karakterli lav akıntıları ile bunlarla ardalanmalı piroklastik düzeyler halinde, camsı-kristal-litik geçişler gösteren ince ve kaba taneli tüfler, lapilli tüfler ve yine bunlarla ardalanmalı lahar çökelleridir. Tüm istif üst düzeylerde bazalt daykları ile kesilir. Araştırmacılar volkanik istifin yaşını Orta-Üst Eosen olarak vermektedir.

**Bargu ve Sakıncı (1987, 1989, 1990);** Yalova bölgesi volkaniklerinden lavları ‘‘Kızderbent andeziti’’, piroklastikleri ise ‘‘Taşlıtepe formasyonu’’ ile ‘‘Kaytazdere formasyonu’’ olarak olarak tanımlamış ve Kaytazdere formasyonunu ‘‘Geyikdere tuf üyesi’’, Tavşanlı tuf üyesi’’ ve Handere tuf üyesi olarak üçe ayırmışlardır. Araştırmacılar volkanosedimanter istifin sığ deniz ortamında çökeldiğini ve bölgenin Oligosen’de kara haline geldiğini belirtmiştir. Lavlar plajiyoklaz, ojit, ve hornblend fenokristalli andezit, tüfler ise genelde camsı hamur içerisinde plajiyoklaz, cam parçaları ve litik parçalar içerir.

### 2.5.2. Araştırma Konusu İle İlgili Çalışmalar

**Feng, N., Jia, H., Hao, T. (1998);** Baraj çimentosu (eşdeğer alkali oranı %0,62) ve normal Portland çimentosu ile hazırlanmış referans harçlara karşılık, eşdeğer alkali oranı %3,67 olan doğal zeolit %30+klinker %65 (eşdeğer alkali oranı %0,89)+alçıtaşı %5 bileşimli çimento ile üretilmiş harçlarda, iki cins reaktif agrega kullanarak alkali silis reaksiyonuna bağlı genleşmelerin gelişimini incelemiştir. Deneyler ASTM C289’a uygun olarak yapılmıştır.

Harç bileşimine doğal zeolit (DZ) ilave edilmesinin alkali-silis reaksiyonu (ASR) gelişimini engellediğini tespit etmişlerdir. 5000cm<sup>2</sup>/g inceliğindeki DZ ile %30 ikame oranıyla elde edilen genleşmeyi önleyici etkinin, DZ inceliği 7000 cm<sup>2</sup>/g ve 10000cm<sup>2</sup>/g mertebesine çıktığında sırasıyla %20 ve %10 ikame oranıyla elde edilebildiğini belirtmiştir.

Agrega-çimento hamuru arayüzü incelemesinde, DZ ilavesinin alkali-silis jeli oluşumuna bağlı genleşmeyi önlemek yoluyla ASR hasarını bastırdığını gözlemlemiştir.

**Poon ve diğ. (1999);** Çimentoya %15 mertebesinde DZ ikamesi ile hamurun porozitesinde azalma, ikame oranı %25’e yükseltildiğinde artış görüldüğünü kaydetmişlerdir. Öte yandan, kür süresi uzadıkça hamurun porozitesinde azalma bulunduğunu belirtmişlerdir. Erken dayanımın doğal zeolit ikame edilmiş karışımlarda saf Portland çimentosu içerenlere kıyasla biraz daha düşük olduğunu, buna karşılık 28. gün ve daha ileri yaşlarda eş değer dayanım görüldüğünü gözlemlemiştir. Doğal

zeolitin ikame oranı arttıkça hidrasyon reaksiyonlarının gelişiminin yavaşladığını vurgulamışlardır.

**Kocakuşak ve diğ. (2001);** Zengin doğal zeolit kaynakları barındıran ülkemizde doğal zeolitlerin de en az sentetik zeolitler kadar teknik ve ticari önem taşıdığı tespitinden hareketle, doğal zeolitlerin uygulama alanlarını araştırmışlardır. Dünyada ve Türkiye’de doğal zeolit üretim teknikleri ve miktarı ile tarım, hayvancılık, evde kullanım, gaz adsorbsiyonu, nem ve koku tutma kabiliyeti, inşaat sektöründe kullanımı vb. yararlarına dikkat çekmişlerdir.

**Ramyar, K., Andic, O. (2003);** Öğütülmüş doğal zeolitin inceliğe bağlı olarak ASR reaksiyonlarına etkisinin incelendiği çalışmada, reaktif agrega ve 200, 400, 600, 800 ve 1000m<sup>2</sup>/kg Blaine özgül yüzeyi inceliğinde öğütülmüş DZ (heulandit içeren) kullanarak harçlar hazırlanmıştır. DZ harç bileşimine kütlece %5-%40 arasında değişen beş farklı ikame oranıyla katılmıştır.

Araştırmacılar incelik değerinden bağımsız olarak %20 ve üzerinde katılan öğütülmüş DZ katkısının ASR genişmesini ASTM C1260 tarafından tanımlanmış kritik sınır değerinin altında tutmaya yeterli olduğunu tespit etmiştir.

**Janotka ve diğ. (2003);** Bileşiminde %35 oranında DZ bulunan katkılı çimentoyu refereans Portland çimentosu ile harç prizmaları üzerinde sülfat hasarına direnç yönünden karşılaştırmış, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, elastisite modülü ve boyca genişleme gibi parametrelerin tamamında DZ katkılı harçların referans Portland çimentosundan çok daha üstün, hatta sülfata dayanıklı çimentonunkine benzer davranış sergilediğini ortaya koymuştur.

**Yılmaz ve diğ. (2007);** Portland çimentolu referans harç ve sırasıyla %5, %10, %20 ve %40 oranında çimentoya ikame klinoptilolit (45µm elek bakiyesi %15,76 ve Blaine inceliği 5404cm<sup>2</sup>/g) katkılı harçlarda normal kıvam için gerekli su ihtiyacının DZ ikame oranına bağlı olarak artmasını zeolitin boşluklu yapısına bağlamıştır.

Referans Portland çimentosuna kıyasla, DZ katkılı karışımlarda  $C_3A$  ve alçıtaşı oranının gerilemesine rağmen, puzolan katkılı çimentoların priz süresinin uzamasını hidrasyon reaksiyonlarının “difüzyon kontrollü” olmasına bağlamıştır. DZ katkılı çimentolarda katkı oranı arttıkça çok ince çimento partiküllerinin DZ boşluklarına hapsolması nedeniyle su difüzyonunun güçleştiğini ve bunun sonucunda da  $C_3A$  fazının çözülmesinin zorlaşmasıyla priz süresinin uzadığını ifade etmiştir.

İkame DZ katkılı harçların 1, 2 ve 7 günlük basınç dayanımlarının Portland çimentolu referans harca kıyasla geride kalmasının, DZ katkılı harçların hidrasyon reaksiyonunun yavaşlığı nedeniyle DZ içindeki reaktif silisin ortamda reaksiyon yapmaya yeterli miktarda CH (kalsiyum hidrat) bulamayışına bağlı olduğunu belirtmiş, 28 gün ve sonrasında DZ katkılı harçların referansinkinden yüksek dayanım değerleri vermesini ortamda yeterli miktarda CH olmasıyla ilişkilendirmiştir.

**Turanlı ve diğ. (2007);** Türkiye doğal zeolitlerinin çimento-beton endüstrisinde puzolanik katkı maddesi ve hafif yapı malzemesi üretiminde hafif agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Gördes (Manisa) ve Bigadiç (Balıkesir) doğal zeolitlerinin önemli düzeyde puzolanik aktivite ve normal Portland çimentosuna kıyasla daha hızlı ilk ve son priz özelliği gösterdiğini, beton karışımlarının klor iyonu geçirgenliği ve alkali-silis reaksiyonu riskini azalttığını ortaya koymuşlardır.

**Çakır Ö. A., Çopuroğlu O., Ramyar K. (2008);** 400, 600 ve 800m<sup>2</sup>/kg Blaine inceliğinde DZ tozu (heulandit-klinoptilolit içeren), uçucu kül ve doğal puzolan katkılarını CEM I 42.5 çimentosuna ikame ederek ASTM C1260’a uygun olarak hazırlanmış numunelerde ASR gelişimine etkilerini incelediği çalışmada, DZ katkısı %20 ve üzerinde olan harç prizmalarının ASR etkisiyle genleşmesinin %80’den fazla gerilediği sonucunu elde etmiştir.

**Mertens ve diğ. (2009);** Doğal zeolit numunelerini üç ayrı incelik seviyesine getirerek yürüttükleri çalışmada daha küçük tane boyu veya daha yüksek özgül yüzeyin erken dönemde daha yüksek puzolanik aktiviteye yol açtığını, ayrıca erken yaşlardaki puzolanik reaktivitenin zeolitin katyon içeriğinden ve katyon değişim kolaylığından da

büyük ölçüde etkilendiğini belirtmiştir. Doğal zeolitın Si/Al oranı ve katyon içeriğinin puzolanik davranışı etkileyen önemli parametreler olduğunu vurgulamıştır.

**Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2010);** ASTM Tip II çimentosuna farklı oranlarda ikame edilmiş %90-95 klinoptilolit içeren DZ numunesi ile harç ve beton numuneleri üretmiştir.

Toplam bağlayıcı miktarı  $400\text{kg/m}^3$ , su/çimento (S/Ç) oranı 0,40 ve 70mm başlangıç kıvamı elde edecek miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı ile üretilmiş beton numunelerinde her yaşta (3, 7, 28 ve 90 gün) referanstan yüksek basınç dayanımı ve referansından düşük miktarda su emme (ikame DZ miktarına bağlı anlamlı bir düşüş olmadan) elde etmiştir.

Ayrıca ASTM C1567'ye uygun ASR deneyinde %20 ve üzeri DZ katkılı harçlarda risksiz bölge sınırları içerisinde kalacak mertebede genleşme ve ASTM C1556'ya uygun klor difüzyonu deneyinde ise %10 ve üzeri DZ katkılı harçlarda klor miktarında bariz gerileme gözlemlenmiştir.

Çimentoya ikame edilen DZ oranındaki artışa bağlı olarak karışımın su ihtiyacında ve dolaylı olarak eş değer kıvama ulaşmak için gerekli süper akışkanlaştırıcı miktarında artış tespit etmişlerdir.

**Perraki ve diğ. (2010);** Doğal zeolit katkılı çimentoların su ihtiyacında yüksek inceliğe bağlı bir artış gözlemlenmiş ancak priz başı ve priz sonu bakımından bir fark görülmediğini belirtmiştir. Silis oranı daha düşük olan doğal zeolitlerin  $\text{Ca(OH)}_2$  ile daha kolay reaksiyon yaptıklarını, buna karşılık silis oranı yüksek doğal zeolitlerin dayanım gelişimine daha fazla katkı sağladıklarını ortaya koymuşlardır.

**Topcu, İ. B., Karakurt, C. (2011);** Bileşiminde %62,8 mertebesinde klinoptilolit içeren doğal zeoliti, çimento bileşimi içerisinde %30 oranında bulunduran çimento ile üretilen harçlarda ASTM C1260'a uygun ASR ve ASTM C1012'ye uygun sülfat direnci deneyleri yapmıştır. Çalışmada çimentonun bütün bileşenleri (klinker, DZ, kalker ve alçıtaşı) bilyalı değirmende birlikte öğütülmüştür.

ASR deneyine tabi tutulan harç prizmalarında, 16 gün sonunda CEM I 42,5R ile üretilenlerin boy uzaması reaktif zonda iken, %30 DZ ikame edilmiş çimento ile üretilenlerin genleşmesinin zararsız zonda olduğu görülmüştür.

%10'luk  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisine maruz bırakılan sülfat direnci prizmalarının boy uzaması, 26. hafta sonunda referans çimento CEM I 42,5R ile üretilenlerde %0,1 sınır değerinin 5 katını aşmış iken, %30 DZ ikame edilmiş çimento ile üretilenlerde sınırın beşte biri mertebesinde ölçülmüştür.

Çalışma kapsamında bileşiminde %10, %20, %30 oranında DZ bulunan çimentolarla harç prizmaları üretilmiş, 2 ve 7 günlük basınç dayanımları CEM I 42.5 ile üretilen referans numunelerin dayanımından düşük olmakla birlikte, 28 günde %10 DZ ve %20 DZ katkılı harçlarda referansının üzerinde ve %30 DZ katkılı harçta ise referansinkine eş değer basınç dayanımı değerleri elde etmiştir.

**Naiqian, F., Xihuang, J., Zhitao, Y., (2012);** %60 klinoptilolit içeren doğal zeolit numunelerini kullanarak, %30 DZ+%65 klinker+%5 alçıtaşı bileşimindeki çimentoyu ve eş değer alkali oranı %0,62 olan baraj çimentosunu (DC, dam cement), kum:çimento oranı 1:2,25 olan referans harçlarla kıyasladığı karışımlarda, 14 gün sonunda referansın %0,0935 mertebesindeki genleşmesine karşılık, toplam eşdeğer alkali miktarı %1,42 olan doğal zeolitli karışımda %0,009 ve toplam eş değer alkali miktarı %1,82 olan doğal zeolitli karışımda ise %0,002 mertebesinde değerler elde etmiştir.

Sertleşmiş çimento hamurunda, çözelti içerisinde bulunan küçük boşluklardaki  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  iyonu konsantrasyonunun doğal zeolitin iyon değişimi özeliği sayesinde azaldığını ve alkali silis reaksiyonuna bağlı genleşmenin önlendiğini ifade etmiştir.

### 3. MALZEME ve YÖNTEM

#### 3.1. MALZEME

Bu çalışmanın temel malzemesini Türkiye'nin değişik yerlerinden temin edilmiş granüler DZ numuneleri oluşturmaktadır. Doğal zeolit numunelerinin karakterizasyonu yapıldıktan sonra, seçilen üç doğal zeolitle hazırlanan harçlarda ise öğütülmüş doğal zeolit (ÖDZ), Portland çimentosu, agrega olarak kum ve karma suyu kullanılmıştır. Harçların bileşiminde kullanılan DZ dışındaki diğer malzemelerin özellikleri ‘‘Bulgular’’ bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

##### 3.1.1. Doğal Zeolit Numunelerinin Alındığı Bölgeler

Çalışma kapsamında incelenen doğal zeolit numuneleri Gördes (Manisa), Bigadiç (Balıkesir), Karamürsel (Yalova) ve Kozaklı (Nevşehir) bölgelerinden temin edilmiştir. Numunelerin temin edildiği bölgeler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Doğal zeolit numunelerinin alındığı bölgeler.

### 3.2. YÖNTEM

#### 3.2.1. Ofis Çalışmaları

Deneylerde kullanılan DZ numunelerinin temin edilebilmesi için, ilk aşamada bir internet araştırması yapılmış ve Türkiye’deki üreticilerin listesi hazırlanmıştır. Daha sonra bu üreticilerle telefon irtibatı sağlanmış, işletmelerin bazılarının halihazırda faaliyetini sürdürmediği ortaya çıkmıştır. Bunun üzerine, özet bilgileri Tablo 3.1’de verilen faal işletmelerin her birinden 200kg kırılmış-elenmiş DZ numunesi temin edilmiştir.

**Tablo 3.1:** Türkiye’de doğal zeolit üretilen yerler.

| Numune Kodu | Bölge                         | Tanım*                                  | Kullanım Alanı                                      | Faaliyet      |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|
| DZ1         | Gördes (Manisa)               | Klinoptilolit (1-4mm)                   | Tarım ve hayvancılık uygulamalarına yönelik         | Faal          |
| DZ2         |                               | Klinoptilolit (1-3mm)                   | Tarım ve hayvancılık uygulamaları, filtre malzemesi | Faal          |
| DZ3         |                               | Klinoptilolit, % 95 saflıkta (1.18-3mm) | Toprak düzenleyici ve yem katkısı                   | Faal          |
| DZ4         | Gördes Kiranköy (Manisa)      | Klinoptilolit (1-3mm)                   | Tarım ve hayvancılık uygulamalarına yönelik         | Faal          |
| DZ5         | Bigadiç (Balıkesir)           | Klinoptilolit, % 95 saflıkta (2-5mm)    |                                                     | Faal          |
| DZ6         |                               | Klinoptilolit (1-4mm)                   |                                                     | Faal          |
| DZ7         |                               | Klinoptilolit (1-4mm)                   |                                                     | Faal          |
| DZ8         | Karamürsel Sermayeci (Yalova) | Klinoptilolit (1-3mm)                   | Beton için mineral katkı                            | Faal          |
| DZ9         | Kozaklı Karasenir (Nevşehir)  | Klinoptilolit, Heulandit (3-6mm)        | Tarım ve hayvancılık uygulamalarına yönelik         | Faal          |
| DZ10        | Simav Şaphane (Kütahya)       | Klinoptilolit, % 95 saflıkta            | Muhtelif endüstrilere yönelik                       | Faal<br>Değil |
| DZ11        | Gördes (Manisa)               | Belli değil                             | Tarım ve hayvancılık uygulamalarına yönelik         | Faal<br>Değil |
| DZ12        | Bigadiç (Balıkesir)           | Bor sahası                              |                                                     | Faal<br>Değil |
| DZ13        | Gördes (Manisa)               | Klinoptilolit                           |                                                     | Faal<br>Değil |

\* Üreticinin beyanına göre.

#### 3.2.2. Arazi Çalışmaları

2011 yılı yaz döneminde yapılan arazi çalışmaları kapsamında, ayrıntılı inceleme için seçilmiş Gördes (Manisa) ve Bigadiç (Balıkesir)’de bulunan DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu

numunelere ait ocaklar ve yakın civarına ait jeoloji haritaları amaca yönelik olarak revize edilmiştir.

### 3.2.3. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar çalışmaları kapsamında, ilk aşamada numunelenen doğal zeolitlerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Daha sonra, belirli bir incelikte öğütülmüş doğal zeolitin harca değişik oranlarda katılması ile, referans ve DZ katkılı taze ve sertleşmiş harçların davranışında ortaya çıkan değişikliklerin ölçülmesi hedeflenmiştir.

Deney çalışmalarının sırası ve kapsamı şu şekildedir:

- Doğal zeolitlerin karakterizasyonuna yönelik deneyler,
- Harçlarda kullanılan bileşenlerin (çimento ve kum) özelliklerinin tayini,
- ÖDZ katkılı taze ve sertleşmiş harç üzerinde yürütülen deneyler.

Deneylerde ihtiyaca göre Türk, Avrupa veya Amerikan standartları kullanılmıştır. Gerektiğinde standart tarifinden farklı olarak gerçekleştirilen kısımlar, ilgili bölümün metni içerisinde açıklanmıştır. Deneylerin kapsamı ve referans alınan standartlar Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Çalışmada düşük ve yüksek çimento dozlu olmak üzere iki ayrı harç serisi üretilmiş ve bu karışımlarda taze birim ağırlık, hapsolan hava miktarı, yayılma gibi taze harç özellikleri ile eğilme ve basınç dayanımı gelişimi, kılcallık, su emme, sülfat hasarı, ASR ve klor difüzyonu gibi sertleşmiş harca ait parametrelerin performansları ölçülmüştür. Çimento ve değişik oranlarda DZ karışımı ile hazırlanan hamurda priz ölçülmüştür. Ayrıca, sertleşmiş harç numuneleri üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla ve harç prizmalarından hazırlanan ince kesitlerde polarizan mikroskopla inceleme yapılmıştır.

Dokuz ayrı üreticiden temin edilen granüler DZ numunelerinin tane boyları farklılık göstermekle birlikte, tamamı 1-6mm aralığındadır. Doğal zeolitin puzolanik aktivite gösterebilmesi ve dolayısıyla harçta mineral katkı olarak kullanılabilmesi için yeterince ince öğütülmüş olması gereklidir. Bu nedenle tüm numuneler, 45µm elek bakiyesi (elek üstünde kalan) %30±3 aralığında olacak şekilde bilyalı laboratuvar değirmeninde öğütülmüştür. Hedef elek bakiyesi seçiminde, hem endüstriyel olarak hem de

Tablo 3.2: Deney kapsamı ve referans standartlar

|                                    | İnceleme / Deney           | Numune                            |                           |              |              |             |           | Referans Standart                      |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|-------------|-----------|----------------------------------------|
|                                    |                            | El Numunesi                       | ÖDZ                       | Granitler DZ | ÖDZ+S. Kireç | ÖDZ+Çimento | Taze Harç | Sertleşmiş Harç                        |
| Doğal Zeolitlerin Karakterizasyonu | Mineralojik İnceleme       | XRD                               | ✓                         |              |              |             |           |                                        |
|                                    | Petrografik İnceleme       | İnce Kesit                        | ✓                         |              |              |             |           |                                        |
|                                    | Kimyasal Özellikler        | Yaş Analiz                        | ✓                         |              |              |             |           | TS EN 196-2/2002                       |
|                                    |                            | XRF                               | ✓                         |              |              |             |           |                                        |
|                                    |                            | Puzolanik Aktivite                |                           |              | ✓            |             |           | TS 25/2008                             |
|                                    |                            | Reaktif Silis                     | ✓                         |              |              |             |           | TS 25/2008                             |
|                                    |                            | Kızdırma Kaybı                    | ✓                         |              |              |             |           | TS EN 196-2/2002                       |
|                                    | Fiziksel Özellikler        | Elek Analizi                      |                           | ✓            |              |             |           | BS EN 933-1/1997                       |
|                                    |                            | İnce Madde Oranı                  |                           | ✓            |              |             |           | TS EN 1097-6/2002                      |
|                                    |                            | Özgül Ağırlık                     | ✓                         | ✓            |              |             |           | TS EN 196-6/2010,<br>TS EN 1097-6/2002 |
|                                    |                            | Su Emme                           |                           | ✓            |              |             |           |                                        |
|                                    |                            | Kıvam Suyu Tayini                 | ✓                         |              |              |             |           | TS EN 196-3/2002                       |
|                                    |                            | Özgül Yüzey (Blaine)              | ✓                         |              |              |             |           | TS EN 196-6/2010                       |
|                                    |                            | Özgül Yüzey (BET)                 | ✓                         |              |              |             |           | ISO 9277/2010                          |
|                                    |                            | Tane Büyüklüğü Dağılımı (Lazer)   | ✓                         |              |              |             |           |                                        |
|                                    |                            | Elek Bakiyesi (Alpine)            | ✓                         |              |              |             |           | TS EN 196-6/2010                       |
|                                    |                            | Mikro Yapı (SEM)                  | ✓                         |              |              |             |           |                                        |
| Harç Bileşenleri                   | Çimento                    | Kimyasal Analiz                   |                           |              |              |             |           | TS EN 196-2/2002                       |
|                                    |                            | Kızdırma Kaybı                    |                           |              |              |             |           | TS EN 196-2/2002                       |
|                                    |                            | Özgül Ağırlık                     |                           |              |              |             |           | TS EN 1097-6/2002                      |
|                                    | Fiziksel Özellikler        | Tane Büyüklüğü Dağılımı (Lazer)   |                           |              |              |             |           |                                        |
|                                    |                            | İncelik (Blaine)                  |                           |              |              |             |           | TS EN 196-6/2010                       |
|                                    |                            | Priz Süresi                       |                           |              |              |             |           | TS EN 196-3/2002                       |
|                                    |                            | Hacim Genleşme Tayini             |                           |              |              |             |           |                                        |
|                                    |                            | Mekanik Özellikler                | Eğilme ve Basınç Dayanımı |              |              |             |           | TS EN 196-1/2002                       |
|                                    | Kum                        | Elek Bakiyesi                     |                           |              |              |             |           | TS EN 196-1/2002                       |
|                                    |                            | Kimyasal Özellikler               |                           |              |              |             |           | TS EN 1744-1/2011                      |
|                                    |                            | Elek Analizi                      |                           |              |              |             |           | TS 3530 EN 933-1/1999                  |
|                                    |                            | Özgül Ağırlık                     |                           |              |              |             |           |                                        |
|                                    |                            | Su Emme                           |                           |              |              |             |           | TS EN 1097-6/2002                      |
|                                    |                            | Geçek Birim Ağırlık               |                           |              |              |             |           | TS EN 1097-3/1999                      |
|                                    |                            | İnce Madde Oranı                  |                           |              |              |             |           | TS 3527/1980                           |
|                                    |                            | Metilen Mavisini                  |                           |              |              |             |           | TS EN 933-9/2001                       |
|                                    |                            | Kum Eşdeğerliği                   |                           |              |              |             |           | TS EN 933-8/2001                       |
|                                    |                            | Organik Madde                     |                           |              |              |             |           | TS EN 1744-1/2011                      |
|                                    |                            | Donma Çözülme Direnci             |                           |              |              |             |           | TS EN 1367-2/1999                      |
|                                    |                            | Mineralojik ve Petrografik Analiz |                           |              |              |             |           |                                        |
| ÖDZ Katkılı Harç                   | Alkali Agrega Reaktivitesi |                                   |                           |              |              |             |           | TS 2517/1977                           |
|                                    | Kıvam Suyu                 |                                   |                           |              | ✓            |             |           | TS EN 196-3/2002                       |
|                                    | Priz Süresi                |                                   |                           |              | ✓            |             |           | TS EN 196-3/2002                       |
|                                    | Yayılma                    |                                   |                           |              |              | ✓           |           | ASTM C 230-08                          |
|                                    | Birim Hacim Ağırlık        |                                   |                           |              |              | ✓           |           | TS EN 12350-6/2002                     |
|                                    | Hava İçeriği               |                                   |                           |              |              | ✓           |           | TS EN 12350-7/2002                     |
|                                    | Eğilme Dayanımı            |                                   |                           |              |              |             | ✓         | TS EN 196-1/2002                       |
|                                    | Basınç Dayanımı            |                                   |                           |              |              |             | ✓         | TS EN 196-1/2002                       |
|                                    | ASR Genleşmesi             |                                   |                           |              |              |             | ✓         | ASTM C 1567-08                         |
|                                    | Sülfat Etkisi              |                                   |                           |              |              |             | ✓         | ASTM C 1012-09                         |
|                                    | Klor İyonu Penetrasyonu    |                                   |                           |              |              |             | ✓         | ASTM C 1202-10                         |
|                                    | Kılcal Su Emme             |                                   |                           |              |              |             | ✓         | BS EN 480-5/2005                       |
|                                    | Serbest Su Emme            |                                   |                           |              |              |             | ✓         |                                        |
|                                    | Petrografik İnceleme       | İnce Kesit                        |                           |              |              |             | ✓         |                                        |
|                                    | SEM                        |                                   |                           |              |              |             | ✓         |                                        |

laboratuvarında üretilebilme açısından makul sayılabilecek bir incelik değeri hedeflenmeye çalışılmıştır. Granüler DZ numunelerinin tane boyu ve öğütüldükten sonraki elek bakiyesi Tablo 3.3'te verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Granüler doğal zeolitin tane boyu ve öğütülmüş doğal zeolitin elek bakiyesi.

| Numune No | Granüler Malzeme Boyu (mm) | 45µm Elek Bakiyesi* (%) |
|-----------|----------------------------|-------------------------|
| DZ 1      | 1-4                        | 30,0                    |
| DZ 2      | 1-3                        | 31,8                    |
| DZ 3      | 1.18-3                     | 30,4                    |
| DZ 4      | 1-3                        | 27,4                    |
| DZ 5      | 2-5                        | 31,2                    |
| DZ 6      | 1-4                        | 27,6                    |
| DZ 7      | 1-4                        | 29,2                    |
| DZ 8      | 0-4                        | 32,7                    |
| DZ 9      | 2-6                        | 27,9                    |

\* Hedeflenen 45µm elek bakiyesi %30±3

## 4. BULGULAR

### 4.1. GENEL

Çalışma kapsamında incelenecek DZ numunelerinin temin edileceği kaynakların belirlenebilmesi amacıyla yapılan tarama sırasında, Türkiye'nin dört ayrı bölgesinde üretim yapılan alanlar öne çıkmıştır. Gördes (Manisa) 4 üretici, Bigadiç (Balıkesir) 3 üretici, Karamürsel (Yalova) 1 üretici ve Kozaklı (Nevşehir) 1 üretici olmak üzere, üretim faaliyetini sürdüren toplam 9 ayrı ocaktan temin edilen DZ numuneleri incelemeye tabi tutulmuştur.

### 4.2. NUMUNELERİN ALINDIĞI BÖLGELERİN JEOLJİSİ

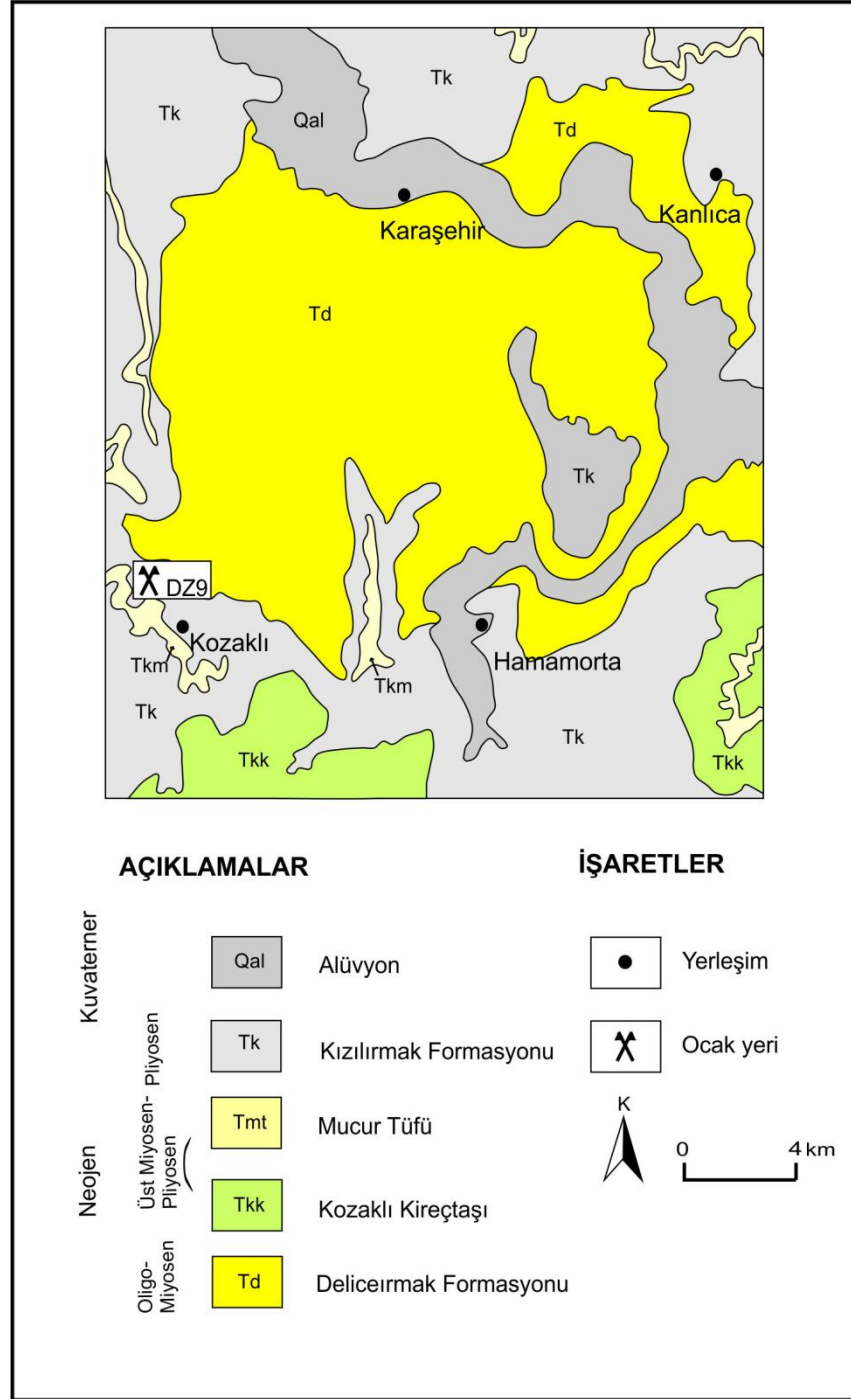
Çalışma kapsamında kullanılan zeolit numunelerinin alındığı Nevşehir-Kozaklı, Manisa-Gördes, Balıkesir-Bigadiç ve Yalova-Sermayeci Köyü bölgelerinin jeolojisi aşağıda genel hatlarıyla sunulmuştur.

#### 4.2.1. Nevşehir-Kozaklı Bölgesinin Jeolojisi

İnceleme alanı Orta Anadolu Bölgesi, Nevşehir ili kuzeyinde bulunan Kozaklı ilçesinde yer almaktadır. Bölgede jeolojik olarak yaşlıdan gence doğru Oligo-Miyosen yaşlı Deliceirmak formasyonu, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Kozaklı kireçtaşı ve Mucur tüfleri, Pliyosen yaşlı Kızılırmak formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar bulunmaktadır (Kara, 1997). Nevşehir-Kozaklı civarının jeoloji haritası Şekil 4.1'de verilmiştir.

Deliceirmak formasyonu regresif özellikte, evaporitli, kırmızı, kahve, gri renkli, paralel-çapraz tabakalanmalı, az köşeli-yuvarlak taneli, gevşek tutturulmuş karasal çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşı araldanmasından oluşmaktadır. Birimin alt düzeylerinde orta-iyi tutturulmuş, ince-orta-kalın tabakalı kumtaşları ile, araldanmalı jips-anhidrit ara bantlı çamurtaşları; orta ve üst düzeylerinde ise çamurtaşlarıyla araldanmalı çakıltası ve kumtaşları bulunmaktadır (Kara ve Dönmez, 1990; Kara, 1997). Deliceirmak

formasyonu, üstündeki Kızılırmak formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür. Birim akarsu ve göl fasiyeslerinde gelişmiştir. Bölgede, birime yaş verebilecek herhangi bir veri elde edilememiştir. Yaşı, Kızılırmak formasyonu tarafından uyumsuzlukla örtülmesi nedeniyle Oligo-Miyosen olarak düşünülmüştür (Kara, 1997), (Şekil 4.1).



**Şekil 4.1:** Nevşehir-Kozaklı civarının jeoloji haritası (Kara, 1997'den değiştirilerek alınmıştır).

Kozaklı kireçtaşı genel olarak yatay konumlu, beyaz, bej renkli, masif kırıntılı, boşluklu killi kireçtaşı olarak tanımlanmıştır. Kalınlığı 1-5m arasında değişen birim, göl ortamında çökelmiştir. Birimin yaşı daha önceki çalışmalarda Üst Miyosen-Pliyosen olarak belirlenmiştir (Kara, 1997), (Şekil 4.1).

Mucur tüfü, yatay konumlu bant ve mercekler şeklinde konumlanan, beyaz, pembe renkli volkanik cam parçalı yumuşak masif volkanikler olarak tanımlanmıştır. Kalınlığı 1-5m arasında değişen birim, Kayseri-Nevşehir volkanizmasının çok uzaklara taşınan küllerinin depolanmasıyla oluşmuştur. Yer yer bentonitleşmiştir. Birimin yaşı önceki çalışmalara göre, Üst Miyosen-Pliyosen olarak belirlenmiştir (Kara, 1997), (Şekil 4.1). DZ9 kodlu doğal zeolit numunesi bu birimden alınmıştır.

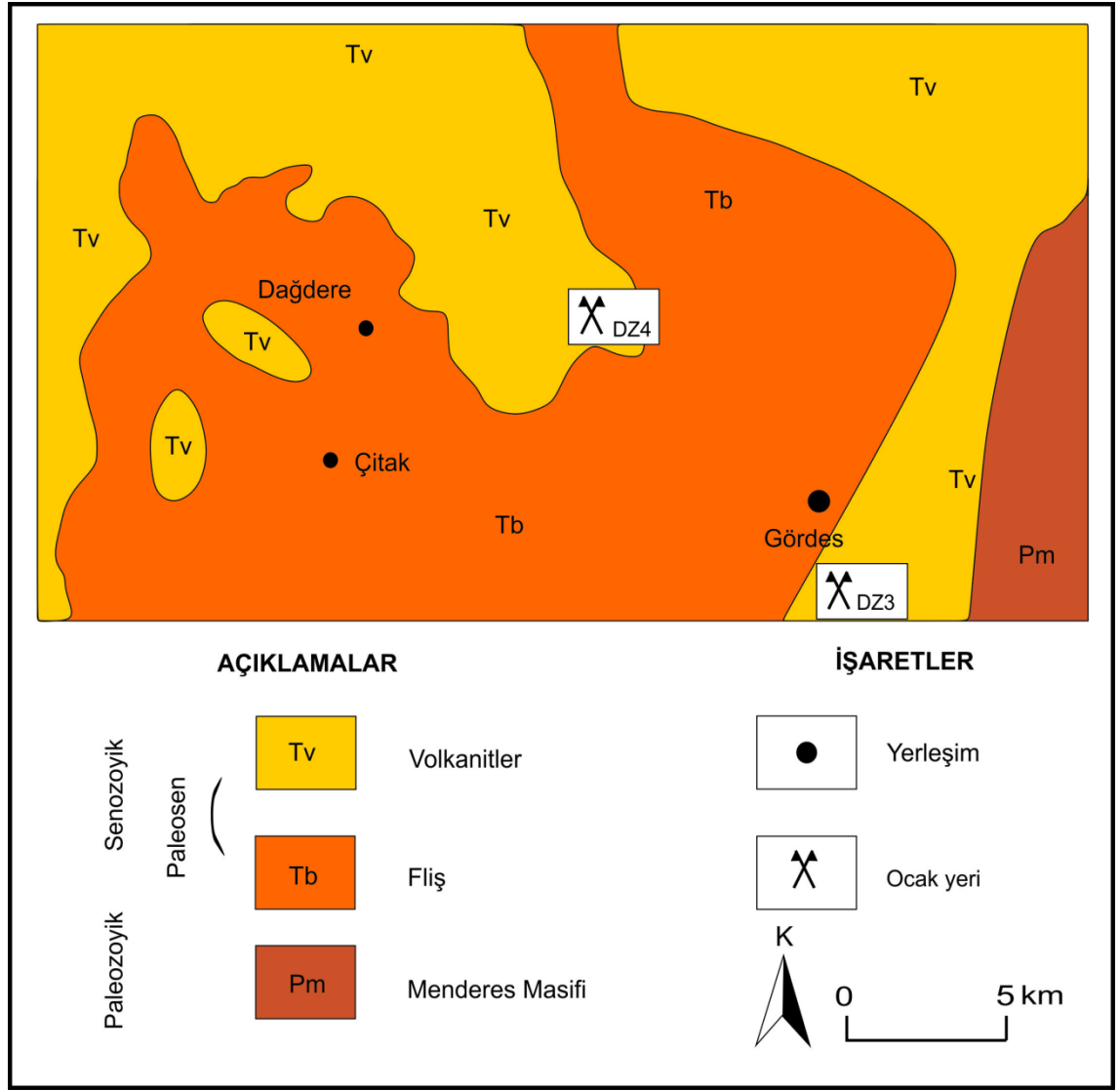
Kızılırmak formasyonu, kırmızı kahve, kahve ve gri renkli, tabakalanma göstermeyen, gevşek, çakıllı, kumlu, yer yer karbonat nodüllü, tuf, kireçtaşı, kumtaşı, çakıltası bant ve mercekleri içeren çamurtaşlarından meydana gelmiştir. Kalınlığı yaklaşık 150m olan birim, sığ göl, akarsu ve yamaç molozu fasiyeslerinde gelişmiştir. Birimin yaşı daha önceki çalışmalarda tespit edilen fosillere dayanarak Pliyosen olarak belirlenmiştir (Kara, 1997), (Şekil 4.1).

İnceleme alanının en genç birimi olan Kuvaterner yaşlı alüvyonlar, vadi ve akarsu yataklarıyla, ova vb. düzlüklerde biriken çakıl, kum ve kil depolanmalarıdır (Kara, 1997).

#### **4.2.2. Manisa-Gördes Bölgesinin Jeolojisi**

İnceleme alanı Batı Anadolu Bölgesi, Manisa ili kuzeyinde yer alan Gördes ilçesi civarında bulunur. Bölgede jeolojik olarak yaşlıdan gence doğru Prekambriyen-Paleozoyik yaşlı Menderes metamorfikleri, Üst Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı Bornova fliş zonu ve Paleosen-Miyosen volkanik fasiyesi bulunmaktadır. Manisa-Gördes civarının jeoloji haritası Şekil 4.2’de verilmiştir.

Batı Anadolu’da geniş alanlarda yüzeylenen Menderes Masifi KD-GB uzanımlı, elips görünümde olup, kuzeybatıda Bornova fliş zonu, kuzeyde Afyon zonu ve güneyde ise



**Şekil 4.2:** Manisa-Göğdes civarının jeoloji haritası (Purvis ve Robertson, 2004'ten değiştirilerek alınmıştır).

Likya Napları tarafından tektonik olarak üzerlenir. Yaklaşık D-B uzanımlı yapısal grabenler (Büyük Menderes ve Gediz Grabenleri vb.) masifi kuzey (Göğdes as masifi), merkez (Ödemiş-Kiraz as masifi) ve güney (Çine as masifi) olmak üzere üç as masife ayırır (Candan ve diğ., 2001; Dora ve diğ., 2001; Koralay ve diğ., 2001, 2004). Masif Prekambriyen yaşlı bir çekirdek ile çekirdeği yapısal olarak üzerleyen Paleozoyik-Senozoyik yaşlı örtü birimlerinden oluşur (Dora ve diğ., 1995; Bozkurt ve Park, 1994; Bozkurt ve Oberhänsli, 2001; Erdoğan ve Güngör, 2004). Çekirdek istif, metamorfizma yaşı 50 milyon yıldan fazla olan gözlü gnays, metagranit, yüksek dereceli şist ve eklojitik metagabroları kapsar (Bozkurt ve Oberhänsli, 2001; Candan ve diğ., 2001). Masifin temel kayaları granülit, eklojit ve amfibolit fasiyesi

koşullarında polimetamorfizmaya uğramışlardır (Dora ve diğ., 1995; Candan ve Dora, 1998; Candan ve diğ., 2001). Menderes masifinin örtü birimleri ise amfibolit ve yeşil şist fasiyesinde metamorfizmaya uğrayan Paleozoyik ve Mesozoyik-erken Eosen olmak üzere iki kısma ayrılmıştır (Bozkurt ve Oberhänsli, 2001; Okay, 2001; Rimmelé ve diğ., 2003; Erdoğan ve Güngör, 2004). Paleozoyik yaşlı birimler; kuvarsit, fillit ve mermerden oluşurken, Mesozoyik-erken Eosen yaşlı birimler ise metakonglomera, şist, dolomit ve platform tipi metakarbonat kayalardan ibarettir (Şekil 4.2).

Bornova fliş zonu 50-90 km genişliğinde, Üst Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı yoğun deformasyon geçirmiş kırıntılı (grovak ve şeyl) bir hamur içinde yer alan değişik kaya (Mesozoyik neritik kireçtaşı ve mafik kayaç) blok ve dilimlerinden oluşur. Bu blok ve dilimler Bornova fliş zonunun batı kesimlerinde daha çok tektonize Mesozoyik kireçtaşı olistolitlerinden, doğu kesiminde ise ofiyolitli melanj (bazalt, radyolaryalı çört ve seyrek serpantinit) litolojilerinden meydana gelmektedir (Erdoğan, 1990; Erdoğan ve diğ., 1990; Okay ve Siyako, 1993; Okay ve Tüysüz, 1999).

Çalışma alanında, Tersiyer başlarında (muhtemelen Paleosen'de) Menderes masifinin yükselmesi ile Simav grabeninin kırık sistemleri gelişmeye başlarken, granit intruzyonları da yerleşimlerini sürdürmüştür. Bunu, çeşitli yerel küçük havzalarda karasal Neojen çökellerin depolanması izlemiştir. Miyosenden başlayarak gelişen volkanizmanın etkinliği bölgede geniş alanlarda yayılım gösterir ve çökel birimlerle yanal geçişlidir (Ercan 1983). Egemen olarak bazik lav, tuf ve aglomera şeklindeki volkanik türevler ile bunlarla ara katkılı olabilen katmanlı çört, çörtlü kireçtaşı ile kırmızımsı şeyl bileşenlerinden ve çok farklı bileşenli bloklardan oluşmuştur. Lavlar başlıca yeşilimsi gri, yer yer morumsu, çok ince taneli, intersertal dokulu ve spilitik özelliktedir. Tüfler, çoğunlukla yeşilimsi gri, orta-kaba taneli, orta-kalın düzensiz katmanlı ve porfiritik dokuludur. Fenokristaller genellikle albit ve kloritleşmiş piroksenden yapılıdır. Hamur maddesi içinde kloritlerden başka serizit, epidot, kuvars ve opak mineraller gözlenir. Aglomeralar yeşilimsi gri ve yer yer morumsu renklerde olup, kötü boylanmıştır. Bileşen taneler, diyabazik lav ve tüftür (Yağmurlu ve Baykal, 1989), (Şekil 4.2).

DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerin temin edildiği ocakların görüntüsü Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



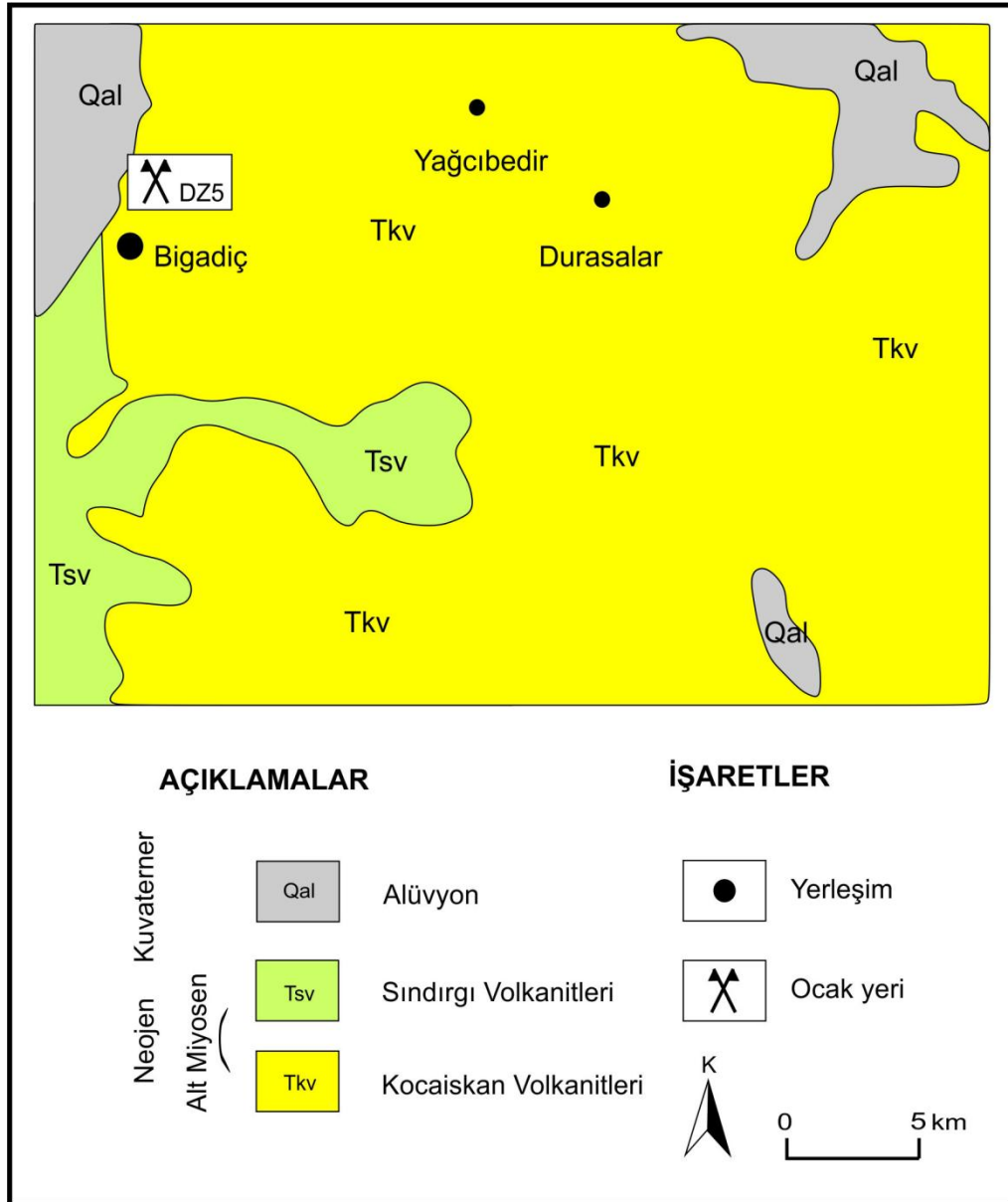
**Şekil 4.3:** DZ3 kodlu numunenin temin edildiği ocağın (Gördes-Manisa) genel görüntüsü.



**Şekil 4.4:** DZ4 kodlu numunenin temin edildiği ocağın (Gördes-Manisa) genel görüntüsü.

#### 4.2.3. Balıkesir-Bigadiç Bölgesinin Jeolojisi

İnceleme alanı Batı Anadolu Bölgesi, Balıkesir ilinin batısında yer alan Bigadiç ilçesinde bulunmaktadır. Bölgede jeolojik olarak yaşlıdan gence doğru erken Miyosen yaşlı Kocaiskan volkanikleri, yine erken Miyosen yaşlı Sındırgı volkanikleri ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar bulunmaktadır. Balıkesir-Bigadiç civarının jeoloji haritası Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Balıkesir-Bigadiç civarının jeoloji haritası (Erkül ve diğ., 2006'dan değiştirilerek alınmıştır).

Kocaiskan volkanik birimi, andezitik dom ve dayk gibi volkanik çıkış merkezleri çevresindeki lavlar, piroklastik çökeller ve volkanojenik tortul kayaçlar ile simgelenir. Birime ait andezitlerde soğuma çatlakları yaygın olup, mavimsi gri ve pembe bir matriks içerisindeki plajiyoklaz ve biyotit, amfibol gibi mafik mineraller ile tanınmaktadır. Bigadiç volkano-sedimanter serisi, volkanoklastik kayaçlar ile ardalama sunan, yer yer borat düzeyleri içeren kıltaşı, silttaşı, laminalı kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve çörtlü kireçtaşından oluşan evaporitik-gölsel tortullardan meydana gelmektedir (Gündoğdu, 1982, 1984; Gündoğdu ve diğ., 1996), (Şekil 4.5).

Sındırgı volkanik birimi dasit ve riylit bileşimli dom, dayk, lav akıntısı ve otobreşler çevresinde yayılım sunan piroklastik çökellerden oluşmaktadır. Krem ve beyaz renkleri ile ayırt edilen riylit lavları, ince taneli matriks içinde akma düzlemleri boyunca gözlenen kuvars ve biyotit mineralleri içerir. Riylit lavlarında koyu gri bantlar ve sferülitler şeklinde izlenen oldukça yaygın devitrifikasyon dokuları gözlenir. Dasitler ise, pembe ve mavimsi gri renkleri ile tanınır ve kıvrımlı akma foliasyon yapısı gösterir. El numunesinde porfirik doku sunan dasit bileşimli lavlar, gri-pembe bir matriks içinde plajiyoklaz, biyotit ve kuvars minerallerinden oluşmuştur (Erkül, 2010).

İnceleme alanının en geç birimi olan Kuvaterner yaşlı alüvyonlar, vadi ve akarsu yataklarıyla, ova vb. düzlüklerde biriken volkanik kökenli çakıl, kum ve kil depolanmalarıdır.

DZ5 kodlu numunenin temin edildiği ocağın görüntüsü Şekil 4.6’da verilmiştir.

#### **4.2.4. Yalova- Sermayeci Bölgesinin Jeolojisi**

İnceleme alanı Marmara Bölgesi, Yalova ilinin batısında bulunan Sermayeci köyünde yer almaktadır. Bölgede jeolojik olarak yaşlıdan gence doğru Paleozoyik yaşlı şist ve mermer, Üst Kretase yaşlı kireçtaşı ve konglomera, Eosen yaşlı volkan tüfü ve andezit lavı, Neojen yaşlı marn, kıltaşı, silttaşı ve konglomera, Kuvaterner yaşlı kil, kum ve çakıl, Kuvaterner yaşlı alüvyonlar bulunmaktadır. Yalova Sermayeci Köyü civarının jeoloji haritası Şekil 4.7’de verilmiştir.



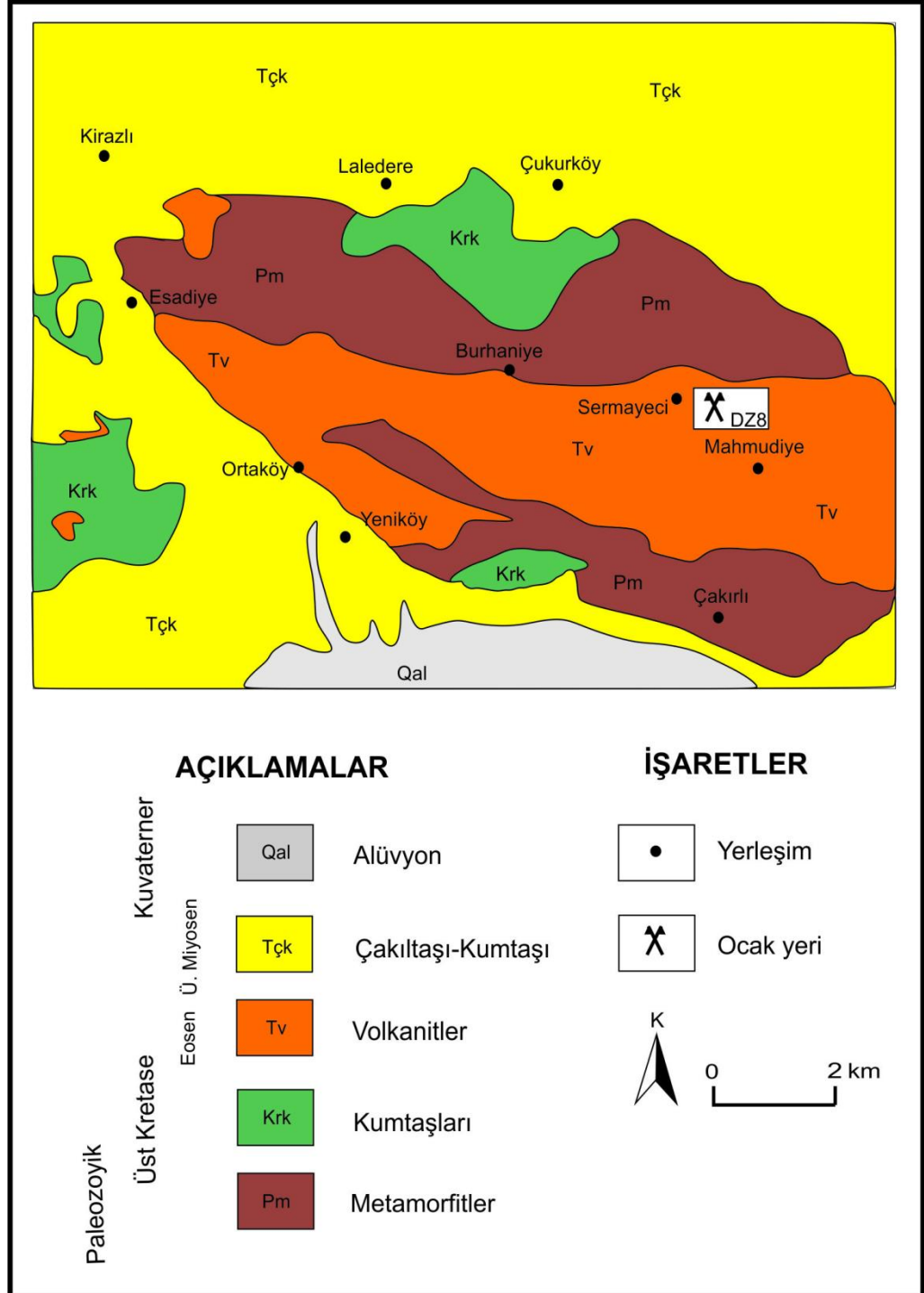
**Şekil 4.6:** DZ5 kodlu numunenin temin edildiği ocağın (Bigadiç-Balıkesir) genel görüntüsü.

Paleozoyik oluşum Armutlu yarımadasının batı ucundan başlar. Yarımadanın batı, güney ve doğu kısımlarında geniş alanlar kaplayan Paleozoyik seri, inceleme alanı dışındaki bölgede Dumanlıdağ'dan başlayıp kuzeydoğu doğrultusunda Çınarcık-Kurtköy çizgisine kadar yayılan volkanik arazi ile kesintiye uğramış ve çok büyük bir olasılıkla örtülmüş bulunmaktadır (Şekil 4.7).

Mesozoyik oluşum ise incelenen sahanın Çukurköy güneyinde, Ortaköy batısında ve Yeniköy güneydoğusunda dar bir alanda görülür. Üçüncü zamanın çeşitli devirlerine ait seriler, dağların karakteristik ve oran bakımından daha yaygın diğer şekillerini oluştururlar. Bunlar Eosen ve Neojen oluşumlar halinde yer yer süreklidirler (Işık, 2007), (Şekil 4.7).

Ortaköy ve Yeniköy'ün kuzeyi ile Burhaniye'nin güneyi ve ayrıca Sermayeci ve Mahmudiye dolayında fliş karakterinde Eosen serisi yer alır. Kum, kumtaşı, ince elemanlı çakıltaşı ve yer yer kireçtaşından oluşan bir Neojen serisi Kirazlı-Çukurköy hattı kuzeyi ile Esadiye-Ortaköy-Yeniköy hattının güneybatısında uzanan alanda görülür. Neojen alan çeşitli yerlerde değişen eğimlerle büyük bir yapıya sahiptir ve

uzun sırtlar, alçak platolar halinde yüzey şekillerinin gelişmesine yardımcı olmuştur. (Işık, 2007), (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Yalova-Sermayeci Köyü civarının jeoloji haritası (Işık 2007'den değiştirilerek alınmıştır).

Neojen formasyonları konglomera, kumtaşı, kilitaşı, silttaşı ve marn seviyelerinin ardalanmalı tabakalar şeklinde sıralanmasından meydana gelmiştir (Işık, 2007), (Şekil 4.7).

En genç birim olan Kuvaterner yaşlı alüvyonlar, inceleme alanının güneyindeki vadi ve akarsu yataklarıyla, ova vb. düzlüklerde biriken farklı kökenli çakıl, kum ve kil depolanmalarıdır.

### **4.3. DOĞAL ZEOLİTLERİN TANIMLANMASI**

#### **4.3.1. Doğal Zeolit Numunelerinin Mineralojisi**

Doğal zeolit numunelerinin mineralojik bileşimi XRD (X-ray Diffraction) yöntemi ile belirlenmiştir. Bu analiz yöntemi, inorganik ve organik malzemelerde X-ışını ile difraksiyon paterninin çekilmesinde ve kalitatif (mineralojik) faz analizlerinde kullanılmaktadır. X-ışını difraktometresiyle mineralojik analiz yöntemi, bilgisayar kontrollü faz taramasını takiben, Hanawalt prensibine göre manuel faz taraması yapma imkanı tanıyan kalitatif bir yöntemdir. Yöntem sayısal değerler içermez, ancak en şiddetli 3 pikin şiddet (intensity) ve d (her bileşiğin atom düzlemleri arasındaki mesafe) değerleri esas alınarak olası fazlar tanımlanır. Faz tanımlaması, olası fazların şiddet ve d değerleri PDF (power diffraction file, toz difraksiyon kartı) ile kıyaslanarak yapılır. Shimadzu XRD-6000 cihazı ile incelenen DZ numunelerinin pik şiddetleri birbirine oranlanarak bulunan yaklaşık analiz sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Numunelenen doğal zeolitlerin tamamında, üreticiler tarafından da beyan edildiği üzere, zeolit grubu minerali olarak klinoptilolit tespit edilmiştir. Ancak numunelerin içerdiği klinoptilolit miktarı, üreticilerin belirttiği mertebenin (%95 civarı) oldukça altındadır. Dokuz DZ numunesi içerisinde klinoptilolit mineralinin oranı %12,3-55,8 aralığındadır. Doğal zeolit numunelerinin bileşiminde klinoptilolit dışında yaygın olarak ve büyük miktarda kuvars ile feldspat, riversideite ve az miktarda illit-montmorillonit mineralleri bulunmaktadır.

**Tablo 4.1:** Doğal zeolit numunelerine ait XRD analiz sonuçları.

| Numune Kodu | Mineral İçeriği* (%) |       |               |        |                |                   |              |
|-------------|----------------------|-------|---------------|--------|----------------|-------------------|--------------|
|             | Feldspat             | İllit | Klinoptilolit | Kuvars | Montmorillonit | Na-Montmorillonit | Riversideite |
| DZ1         | 14,8                 | 5,9   | 33,7          | 25,4   | -              | -                 | 20,1         |
| DZ2         | 20,8                 | 2,9   | 18,5          | 57,8   | -              | -                 | -            |
| DZ3         | 24,0                 | 4,8   | 55,8          | 15,4   | -              | -                 | -            |
| DZ4         | 21,0                 | 4,8   | 45,7          | 28,6   | -              | -                 | -            |
| DZ5         | 12,9                 | 2,4   | 35,7          | 49,1   | -              | -                 | -            |
| DZ6         | -                    | -     | 12,3          | 55,9   | 2,8            | -                 | 29,1         |
| DZ7         | 9,7                  | -     | 30,4          | 48,3   | -              | -                 | 11,6         |
| DZ8         | 20,5                 | -     | 13,3          | 66,2   | -              | -                 | -            |
| DZ9         | 15,3                 | 2,9   | 46,0          | 29,9   | -              | 5,8               | -            |

\*Yaklaşık

Klinoptilolit minerali altere volkanik tüfler ve tuzlu, alkalın göl istifleri içerisinde milyon ton mertebesinde rezervler sunan en yaygın doğal zeolit türüdür. Tipik olarak 2-20µm boyunda kristallerden oluşur ve diğer ince taneli minerallerle birlikte bulunur. Levha yapılı bir mineraldir ve monoklinal kristallerden oluşur. Mohs sertliği 3,5-4,0 mertebesinde. Klinoptilolit minerali 1932 yılına kadar (Schaller, 1932) ayrı bir mineral olarak tanımlanamamış ve mafik magmatik kayaç boşlukları ile bazı sedimanter yataklarda, çoğunlukla da klinoptilolit ile birlikte bulunan makroskopik kristalli (0,2-2cm boyunda) heulandit minerali ile karıştırılmıştır. Kimyasal bileşimlerinin ve kafes yapılarının benzerliği nedeniyle, iki mineralin ayrımı ancak kristal boylarının ve oluşum şekillerinin farklılığı sayesinde mümkün olabilmektedir. Klinoptilolit minerali, Hey ve Bannister (1968) tarafından silişçe zengin bir heulandit olarak tarif edildiğinden beri iki mineralin ayrımı konusundaki karışıklık devam etmektedir. Ancak klinoptilolit ve heulanditin Si/Al oranları, oluşum şekilleri, termal davranışı ve katyon değişimleri birbirinden farklıdır (Breck 1974, Bish ve Ming 2001). İki mineralin kimyasal bileşimleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

Klinoptilolit  $(\text{Na}, \text{K})_6[\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}]\cdot 20\text{H}_2\text{O}$

Heulandit  $(\text{Na}, \text{K})\text{Ca}_4[\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}]\cdot 24\text{H}_2\text{O}$

Zeolitik puzolanlar camı yapıda olanlara göre daha reaktiftir. Klinoptilolit ve herşelit, zeolit grubu mineralleri içerisinde analsime kıyasla daha aktif olan minerallerdir (Hewlett, 2008).

#### 4.3.2. Doğal Zeolit Numunelerinin Petrografisi

Doğal zeolitlerin el numunelerinden ince kesitler hazırlanmış ve polarizan mikroskop altında incelenmiştir. Elde edilen bulgular ve sınıflama Tablo 4.2’de sunulmuştur. Tablo 4.2’de görüldüğü gibi, numunelenen zeolitlerin tümü tüflerde gelişmiştir. Kristal yapılı DZ8 dışındaki tüm numuneler camsı yapıdadır.

**Tablo 4.2:** Doğal zeolit numunelerinin petrografik özellikleri.

| Numune Kodu | Petrografik Bileşim                                                                                                                                                                | Doku                              | Sınıflandırma (Schmidt 1981) |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| DZ1         | Kuvars (irili-ufaklı, çatlaklı), feldspat (plajiyoklaz, sanidin), biyotit, kayaç parçası (volkanik), zeolit<br>Hamur: Volkanik cam, zeolit ve gaz boşlukları                       | Holohyalin (camsı)                | Camsı zeolitik tüf           |
| DZ2         | Kuvars (çatlaklı), plajiyoklaz (yaklaşık %10), kayaç parçası (volkanik), feldspat (sanidin?), oksitlenmiş mineral (opak?)<br>Hamur: Çoğunlukla volkanik cam, zeolit                | Holohyalin (camsı) porfirik       | Camsı zeolitik tüf           |
| DZ3         | Kuvars, volkanik cam, klorit, opak mineral<br>Hamur: Volkanik cam, pomza, zeolit                                                                                                   | Holohyalin (camsı)                | Camsı kül tüf                |
| DZ4         | Kuvars, feldspat (plajiyoklaz, sanidin), kayaç parçaları (metamorfik, volkanik)<br>Hamur: Volkan camı (devirifikasyon), zeolit, oksitlenmiş cam, pomza                             | Holohyalin (camsı)                | Camsı tüf                    |
| DZ5         | Kuvars (ince-iri taneli), feldspat (plajiyoklaz), biyotit<br>Hamur: Volkanik cam (kloritleşme ve zeolitleniş), oksitlenmiş (opak) mineral, pomza ve gaz boşlukları                 | Hipohyalin                        | Camsı riyoitik tüf           |
| DZ6         | Volkan külü, volkanik cam (az oranda killeşme), kuvars (çok ince taneli, çok küçük kuvarslar dışında kristal içermiyor) (2 no’lu kesite benzer)                                    | Holohyalin (camsı)                | Camsı kül tüf                |
| DZ7         | Volkanik cam                                                                                                                                                                       | Holohyalin (camsı)                | Camsı kül tüf                |
| DZ8         | Kuvars, opak mineral, feldspat (plajiyoklaz), amfibol<br>Mineraller bol kırık ve çatlaklı, biyotit (?)<br>Hamur: Volkanik cam (yer yer killeşmiş), pomza, zeolit, küçük kristaller | Hipokristalin/Hipohyalin porfirik | Kristal dasitik tüf          |
| DZ9         | Kuvars, kayaç parçaları<br>Hamur: Kısmen killeşmiş volkanik cam, gaz boşlukları<br>(2 ve 7 nolu numune ile benzer)                                                                 | Holohyalin (camsı)                | Camsı tüf                    |

#### 4.3.3. Doğal Zeolit Numunelerinin Kimyasal Özellikleri

Doğal zeolit numunelerinin kimyasal karakterini ortaya koyabilmek ve numuneler içerisinden ayrıntılı deney programı için seçilecekleri belirlemek amacıyla bir dizi inceleme yapılmıştır.

##### 4.3.3.1. Yaş Analiz

Yaş analiz yönteminde, numuneler 200 $\mu$ m'lik elekten geçecek inceliğe kadar öğütüldükten sonra değişik kimyasal maddeler kullanarak veya ısıtma işlemine tabi tutularak gravimetri veya titrasyon ile kimyasal bileşimleri tayin edilmiştir.

İncelenen doğal zeolit numunelerinin yaş analiz sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Yaş analiz için "TS EN 196-2:2002 Çimento Deney Metotları - Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi" ve TS 25:2008 Doğal Pozolan (Tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gerekliler ve Uygunluk" adlı standartların gereklerine uyulmuştur. TS 25:2008 standardındaki tarife göre doğal pozolanların karşılaması gereken kimyasal özellikler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, DZ6 kodlu numunenin  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamı %68,88 değeri ile standardın %70'ten büyük olma şartını karşılayamamıştır. Dolayısıyla TS 25'e göre DZ6 kodlu numune doğal pozolan olarak değerlendirilemez. Bunun dışındaki tüm numunelerin, TS 25 tarafından tanımlanmış sınır değerlerine tam uygun olduğu görülmektedir (Tablo 4.4).

Doğal pozolanların çimento içerisindeki (veya çimentolu karışımlardaki) aktivitesini etkileyen önemli parametrelerden biri reaktif silis içeriğidir. İncelenen numunelerin reaktif silis içeriği %43,38-62,64 aralığında değişmektedir. "TS EN 197-1:2002, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" standardındaki tanıma göre, doğal pozolanların reaktif silis içeriği, TS 25'te de tariflendiği gibi ağırlıkça %25'ten az olmamalıdır. Tablo 4.4 incelendiğinde, reaktif silis içeriği en düşük ve  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamı bakımından TS 25'in doğal pozolan şartını sağlayamayan DZ6 kodlu numunenin bile %43,38 ile sınırın oldukça üzerinde bir reaktif silis değeri sergilediği görülmektedir.

**Tablo 4.3:** Doğal zeolit numuneleri üzerinde yapılan yaş analiz sonuçları\*.

| Numune Kodu         | Kızdırma Kaybı | Çözünmeyen Kalıntı | Toplam SiO <sub>2</sub> | Reaktif SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Bilinmeyen | Klorür | SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> |
|---------------------|----------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                     | (%)            | (%)                | (%)                     | (%)                      | (%)                            | (%)                            | (%)  | (%)  | (%)        | (%)    | (%)                                                                              | (%)             |
| <b>DZ1 Gördes</b>   | 9,80           | 58,03              | 70,30                   | 55,31                    | 10,40                          | 1,91                           | 4,54 | 0,62 | 2,49       | 0,004  | 82,6                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ2 Gördes</b>   | 8,78           | 52,55              | 70,34                   | 51,26                    | 10,63                          | 1,53                           | 2,18 | 0,43 | 6,13       | 0,003  | 82,5                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ3 Gördes</b>   | 11,95          | 37,75              | 66,94                   | 62,64                    | 10,51                          | 2,16                           | 1,28 | 2,49 | 3,28       | 0,004  | 79,6                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ4 Gördes</b>   | 9,82           | 51,90              | 72,23                   | 61,74                    | 10,55                          | 2,35                           | 1,34 | 1,57 | 1,70       | 0,003  | 85,1                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ5 Bigadiç</b>  | 12,06          | 44,66              | 66,06                   | 57,10                    | 11,32                          | 1,26                           | 1,35 | 3,14 | 4,12       | 0,005  | 78,6                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ6 Bigadiç</b>  | 16,15          | 40,25              | 57,95                   | 43,38                    | 9,85                           | 1,08                           | 9,33 | 3,93 | 1,46       | 0,004  | 68,9                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ7 Bigadiç</b>  | 11,71          | 44,38              | 66,19                   | 54,13                    | 10,78                          | 1,51                           | 4,37 | 1,33 | 3,50       | 0,002  | 78,5                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ8 Yalova</b>   | 7,14           | 69,70              | 69,85                   | 50,93                    | 11,62                          | 1,92                           | 2,86 | 1,36 | 5,13       | 0,005  | 83,4                                                                             | Eser Miktar     |
| <b>DZ9 Nevşehir</b> | 12,59          | 40,06              | 66,24                   | 62,12                    | 12,85                          | 1,68                           | 2,69 | 1,48 | 2,52       | 0,003  | 80,8                                                                             | Eser Miktar     |

\* Ağırlıkça %.

Numunelerin klorür içeriği 0,002-0,005 aralığındadır ve TS 25:2008 standardında sınır olarak verilen %0,1 değerinin oldukça altındadır. Yaş analiz sonuçlarına göre doğal zeolit numunelerinde  $\text{SO}_3$  eser miktarda bulunmaktadır (Tablo 4.4).

**Tablo 4.4:** Doğal puzolanların TS 25’te tanımlı kimyasal gereklere uygunluğu.

| Kimyasal Özellik                                                     | Kütlece (%)  |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                                                      | TS 25 Sınırı | DZ1         | DZ2         | DZ3         | DZ4         | DZ5         | DZ6         | DZ7         | DZ8         | DZ9         |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (min) | 70,0         | 82,61       | 82,50       | 79,61       | 85,13       | 78,64       | 68,88       | 78,48       | 83,39       | 80,77       |
| $\text{SO}_3$ (max)                                                  | 3,0          | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar | Eser Miktar |
| Reaktif silis (min)                                                  | 25,0         | 55,31       | 51,26       | 62,64       | 61,74       | 57,10       | 43,38       | 54,13       | 50,93       | 62,12       |
| Klorür (max)                                                         | 0,1          | 0,004       | 0,003       | 0,004       | 0,003       | 0,005       | 0,004       | 0,002       | 0,005       | 0,003       |

**Not:** TS 25’e uygun doğal puzolan kontrolsüz genişmeye sebep olabilecek serbest periklas ihtiva etmediğinden magnezyum oksit ( $\text{MgO}$ ) için herhangi bir değer verilmemektedir.

#### 4.3.3.2. XRF Analizi

XRF (X-ray Fluorescence) yönteminin esası, katı haldeki inorganik ve organik malzemelerde bulunan elementlerin tanımlanması, yarı kantitatif olarak element ve bileşik miktarlarının belirlenmesi ve kantitatif olarak standart referans numuneleri olan malzeme gruplarında elementlerin dalga boylarını kullanarak element analizi yapmaktır. İncelemede Philips PW 2404 model, dalga boyu dağılımlı cihaz kullanılmıştır.

İncelenen DZ numunelerinin XRF analiz sonuçları Tablo 4.5 (elementel) ve Tablo 4.6’da (oksitler) verilmiştir.

**Tablo 4.5:** Doğal zeolit numuneleri üzerinde yapılan XRF analiz sonuçları (elementel, %).

| <b>Element</b> | <b>DZ1</b> | <b>DZ2</b> | <b>DZ3</b> | <b>DZ4</b> | <b>DZ5</b> | <b>DZ6</b> | <b>DZ7</b> | <b>DZ8</b> | <b>DZ9</b> |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Al</b>      | 7,23       | 7,19       | 7,16       | 7,18       | 7,02       | 6,37       | 7,16       | 7,64       | 7,86       |
| <b>As</b>      | -          | -          | -          | -          | 0,01       | 0,01       | 0,01       | -          | -          |
| <b>Ba</b>      | 0,03       | 0,04       | 0,08       | 0,03       | 0,03       | 0,04       | 0,04       | 0,06       | 0,11       |
| <b>Ca</b>      | 2,50       | 1,56       | 2,60       | 1,49       | 2,94       | 8,59       | 3,19       | 2,69       | 2,18       |
| <b>Cr</b>      | -          | 0,00       | -          | 0,00       | -          | -          | 0,003      | -          | 0,00       |
| <b>Cu</b>      | 0,00       | 0,00       | -          | 0,00       | -          | -          | -          | -          | 0,00       |
| <b>Fe</b>      | 1,00       | 0,90       | 0,85       | 0,87       | 0,90       | 0,82       | 0,78       | 1,11       | 1,10       |
| <b>Ga</b>      | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | -          | -          | -          | -          | -          |
| <b>K</b>       | 3,51       | 4,26       | 2,07       | 3,65       | 2,53       | 2,62       | 2,45       | 2,59       | 0,87       |
| <b>Mg</b>      | 0,93       | 0,22       | 0,93       | 0,86       | 1,08       | 3,05       | 1,11       | 0,65       | 1,04       |
| <b>Mn</b>      | 0,05       | 0,02       | 0,03       | 0,02       | 0,02       | 0,03       | 0,02       | 0,02       | 0,01       |
| <b>Na</b>      | 0,23       | 0,50       | 0,12       | 0,08       | 0,07       | 0,07       | 0,08       | 0,47       | 1,49       |
| <b>Nb</b>      | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | -          | 0,00       | -          | -          |
| <b>Ni</b>      | 0,00       | -          | 0,00       | -          | 0,00       | -          | 0,00       | -          | 0,00       |
| <b>O</b>       | 49,33      | 49,42      | 49,99      | 49,74      | 49,56      | 47,25      | 49,52      | 49,53      | 49,86      |
| <b>P</b>       | 0,01       | 0,03       | 0,02       | 0,01       | 0,01       | 0,03       | 0,01       | 0,03       | 0,03       |
| <b>Pb</b>      | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | -          | -          | -          | -          | -          |
| <b>Rb</b>      | 0,02       | 0,02       | 0,01       | 0,01       | 0,02       | 0,02       | 0,02       | 0,01       | 0,00       |
| <b>S</b>       | 0,12       | 0,03       | 0,01       | 0,01       | 0,03       | 0,04       | 0,01       | 0,03       | 0,04       |
| <b>Si</b>      | 34,92      | 35,70      | 36,00      | 35,96      | 35,40      | 30,74      | 35,23      | 34,98      | 35,01      |
| <b>Sr</b>      | 0,03       | 0,01       | 0,05       | 0,03       | 0,30       | 0,28       | 0,29       | 0,03       | 0,24       |
| <b>Th</b>      | 0,00       | 0,00       | -          | 0,00       | 0,00       | -          | -          | -          | -          |
| <b>Ti</b>      | 0,06       | 0,06       | 0,05       | 0,04       | 0,05       | 0,05       | 0,04       | 0,15       | 0,14       |
| <b>Y</b>       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,00       | -          |
| <b>Zn</b>      | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,00       | 0,01       | 0,00       | 0,00       |
| <b>Zr</b>      | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,01       | 0,02       | -          | 0,02       | 0,02       | -          |

**Tablo 4.6:** Doğal zeolit numuneleri üzerinde yapılan XRF analiz sonuçları (oksitler, %).

| Oksit                          | DZ1   | DZ2   | DZ3   | DZ4   | DZ5   | DZ6   | DZ7   | DZ8   | DZ9   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,67 | 13,59 | 13,53 | 13,56 | 13,27 | 12,03 | 13,53 | 14,43 | 14,85 |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -     | -     | -     | -     | 0,01  | 0,02  | 0,01  | -     | -     |
| BaO                            | 0,03  | 0,05  | 0,08  | 0,03  | 0,03  | 0,05  | 0,04  | 0,07  | 0,12  |
| CaO                            | 3,50  | 2,18  | 3,64  | 2,08  | 4,11  | 12,02 | 4,46  | 3,76  | 3,05  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -     | 0,00  | -     | 0,00  | -     | -     | 0,00  | -     | -     |
| CuO                            | 0,00  | 0,00  | -     | 0,00  | -     | -     | -     | -     | 0,00  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,43  | 1,29  | 1,22  | 1,24  | 1,29  | 1,17  | 1,12  | 1,59  | 1,57  |
| Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | -     | -     | -     | -     | -     |
| K <sub>2</sub> O               | 4,22  | 5,13  | 2,49  | 4,40  | 3,04  | 3,15  | 2,95  | 3,13  | 1,05  |
| MgO                            | 1,53  | 0,37  | 1,54  | 1,43  | 1,79  | 5,06  | 1,84  | 1,08  | 1,72  |
| MnO <sub>2</sub>               | 0,08  | 0,03  | 0,04  | 0,03  | 0,04  | 0,05  | 0,04  | 0,03  | 0,02  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,31  | 0,68  | 0,17  | 0,10  | 0,10  | 0,09  | 0,11  | 0,64  | 2,00  |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | -     | 0,00  | -     | -     |
| NiO                            | 0,01  | -     | 0,00  | -     | 0,01  | -     | 0,00  | -     | 0,00  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,02  | 0,06  | 0,05  | 0,02  | 0,02  | 0,06  | 0,03  | 0,06  | 0,08  |
| PbO                            | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | -     | -     | -     | -     | -     |
| Rb                             | 0,02  | 0,02  | 0,01  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,01  | 0,00  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,30  | 0,08  | 0,03  | 0,04  | 0,06  | 0,10  | 0,02  | 0,08  | 0,11  |
| SiO <sub>2</sub>               | 74,70 | 76,38 | 77,02 | 76,92 | 75,73 | 65,77 | 75,36 | 74,83 | 74,90 |
| SrO                            | 0,03  | 0,01  | 0,06  | 0,04  | 0,36  | 0,39  | 0,35  | 0,04  | 0,29  |
| ThO <sub>2</sub>               | 0,00  | 0,00  | -     | 0,00  | 0,00  | -     | -     | -     | -     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,10  | 0,10  | 0,09  | -     | 0,08  | 0,09  | 0,07  | 0,25  | 0,23  |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,00  | -     |
| ZnO                            | 0,01  | 0,01  | 0,00  | 0,01  | 0,00  | 0,00  | 0,01  | 0,00  | 0,01  |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,02  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,03  | -     | 0,03  | 0,03  | -     |

#### 4.3.3.3. *Puzolanik Aktivite*

Puzolanik aktivite deneyi ‘‘TS 25: Aralık 2008 Doğal Puzolan (Tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri’’ adlı standardın Ek A kısmında tarif edildiği şekilde yapılmıştır. Bu tarife göre, deneye tabi tutulacak doğal puzolan numunelerinin özgül yüzeyinin  $4000\text{cm}^2/\text{g} \pm \%25$  Blaine inceliğinde olması istenmektedir. Ancak diğer deney sonuçlarıyla tutarlılık ve kıyaslanabilirlik sağlaması amacıyla, bu deneyde standardın tarifinden farklı olarak Blaine inceliği hedefi dikkate alınmamış,  $45\mu\text{m}$  elek bakiyesi  $\%30 \pm 3$  hedefine göre öğütülen DZ numuneleri kullanılmıştır (Tablo 3.2). Deneye tabi tutulan DZ numunelerinin Blaine ve BET (Brunauer, Emmett ve Teller tarafından tanımlanmış, gözenekli katı maddelerin yüzey alanını ölçme yöntemi) değerleri Tablo 4.13’te verildiği gibidir. Özgül yüzey

ölçümünde “TS EN 196-6:2010 Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 6: İncelik Tayini” standardının tarifine uyulmuştur.

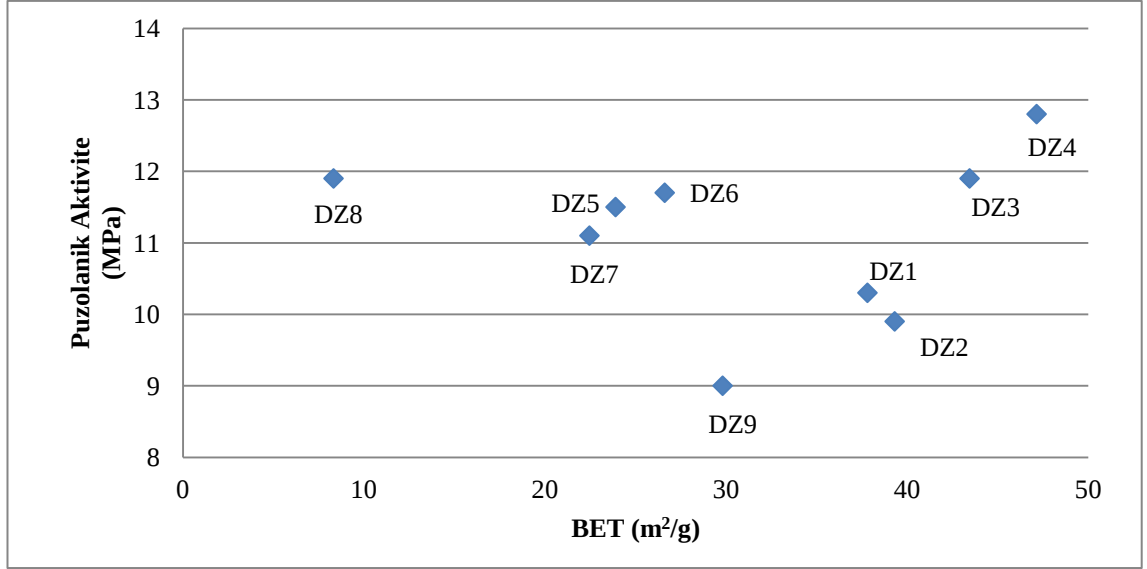
TS 25: 2008 standardındaki puzolanik aktivite tanımına göre, sönmüş kireç  $[Ca(OH)_2]$ , belirli bir incelikte öğütülmüş doğal puzolan ve TS EN 196-1’e uygun standart kum karışımı ile “TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım” standardındaki tarife uygun olarak hazırlanan prizma numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı 4MPa’dan büyük olmalıdır. Tarif edilen yöntemle ölçülmüş puzolanik aktivite deney sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir.

**Tablo 4.7:** Doğal zeolit numunelerinin puzolanik aktivitesi (TS 25:2008’e göre).

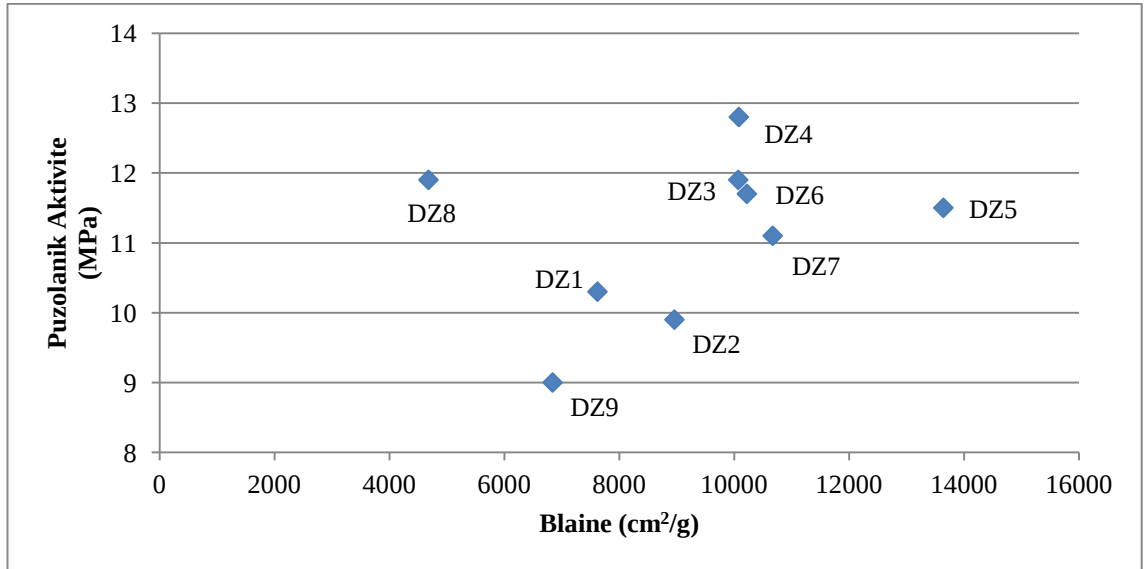
| Numune Kodu | Numunenin Alındığı Yer | Puzolanik Aktivite (MPa) |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| DZ1         |                        | 10,3                     |
| DZ2         | Gördes (Manisa)        | 9,9                      |
| DZ3         |                        | 11,9                     |
| DZ4         |                        | 12,8                     |
| DZ5         | Bigadiç (Balıkesir)    | 11,5                     |
| DZ6         |                        | 11,7                     |
| DZ7         |                        | 11,1                     |
| DZ8         | Karamürsel (Yalova)    | 11,9                     |
| DZ9         | Kozaklı (Nevşehir)     | 9,0                      |

Tablo 4.7’de görüldüğü gibi, incelenen DZ numunelerinin puzolanik aktivitesi standartta tanımlı sınır değerın 2,5-3 katı mertebesinde. Bu durum, öncelikle standart gereğinin oldukça yukarısında bulunan reaktif silis miktarı olmak üzere, doğal zeolitlerin kimyasal bileşimlerinin (Tablo 4.4) ve standardın tanımından daha yüksek incelikte öğütülmüş olmalarının (Tablo 4.13) ortak sonucudur. Kimyasal ve mineralojik bileşimleri farklı olmasına rağmen, DZ numuneleri puzolanik aktivite bakımından birbirlerine oldukça yakın değerler sunmaktadır.

Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Tablo 4.7’de sunulan puzolanik aktivite karakterleri ile Tablo 4.13’te sunulan BET ve Blaine incelikleri arasında anlamlı bir ilişki görülmemektedir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9).



Şekil 4.8: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin BET-Puzolanik aktivite ilişkisi.



Şekil 4.9: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine-Puzolanik aktivite ilişkisi.

Genel olarak doğal zeolitin puzolanik aktivitesinin mikrosilis ve uçucu kül arası bir mertebede olduğu ifade edilmektedir (Poon ve diğ, 1999).

Erken yaşlardaki aktivite temel olarak puzolanın özgül yüzeyine bağlı iken, ileri yaşlardaki veya nihai aktivite ise puzolanın kimyasal ve mineralojik bileşimi ile ilişkilidir (Hewlett, 2008).

#### 4.3.3.4. *Reaktif Silis İçeriği*

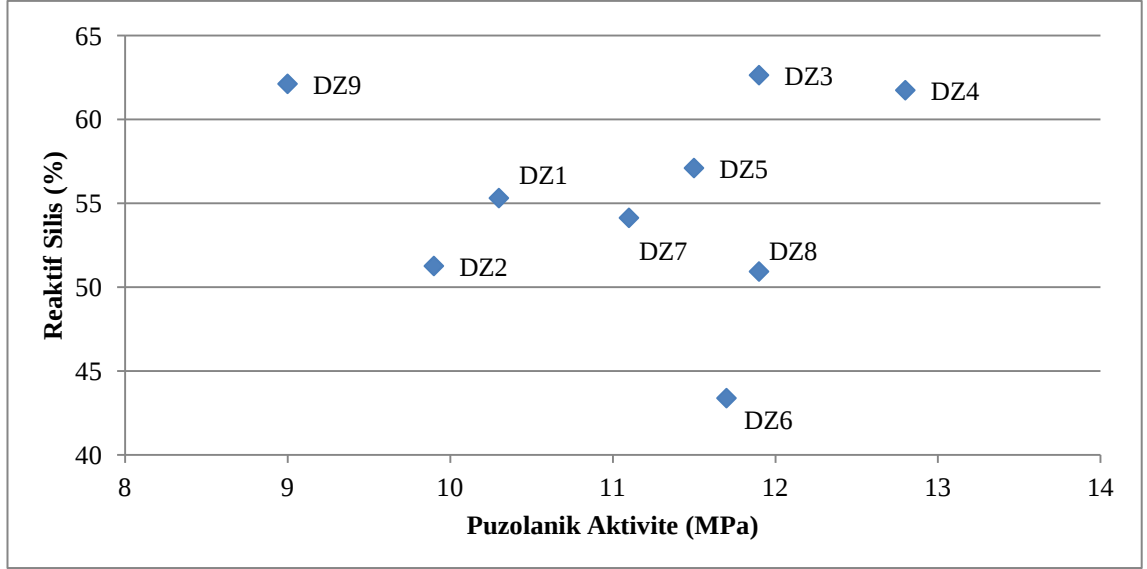
Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis tayini ‘‘TS 25: Aralık 2008 Doğal Puzolan (Tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri’’ adlı standartta tarif edildiği şekilde yapılmıştır. Numunelerin içerdiği reaktif silisin ağırlıkça oranı Tablo 4.8’de verilmiştir.

**Tablo 4.8:** Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis içeriği.

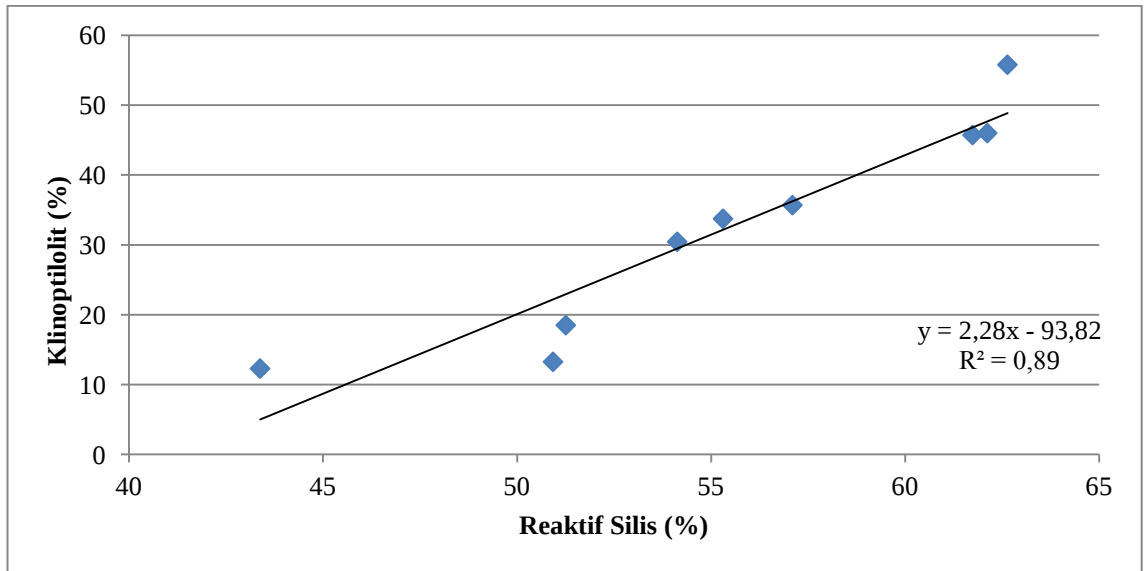
| Numune Kodu | Numunenin Alındığı Yer | Reaktif SiO <sub>2</sub> (%) |
|-------------|------------------------|------------------------------|
| DZ1         |                        | 55,3                         |
| DZ2         | Gördes (Manisa)        | 51,3                         |
| DZ3         |                        | 62,6                         |
| DZ4         |                        | 61,7                         |
| DZ5         | Bigadiç (Balıkesir)    | 57,1                         |
| DZ6         |                        | 43,4                         |
| DZ7         |                        | 54,1                         |
| DZ8         | Karamürsel (Yalova)    | 50,9                         |
| DZ9         | Kozaklı (Nevşehir)     | 62,1                         |

Tablo 4.8’deki sonuçlar incelendiğinde, dokuz numune içerisinde en düşük reaktif silis değerinin %43,4 ile DZ6 kodlu numuneye ait olduğu görülmektedir. Bunun dışındaki numunelerin reaktif silis oranının birbirine daha yakın (%50,9-62,6 aralığında) olduğu dikkati çekmektedir.

Reaktif silis içeriği (Tablo 4.8) ile puzolanik aktivite (Tablo 4.7) arasında anlamlı bir ilişki görülmemiştir (Şekil 4.10). Bu durum puzolanik aktivite üzerinde numune inceliğinin de büyük rol oynaması ile ilişkilendirilmiştir. Ancak DZ numunelerinin reaktif silis içeriği (Tablo 4.8) ile klinoptilolit oranı (Tablo 4.1) arasında gayet tutarlı bir ilişki bulunmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.10: Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis içeriği ve pozolanik aktivite ilişkisi.



Şekil 4.11: Doğal zeolit numunelerinin reaktif silis içeriği ve klinoptilolit oranı ilişkisi.

#### 4.3.3.5. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Kızdırma Kaybı

Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinde kızdırma kaybı tayininde “TS EN 196-2: Mart 2002 Çimento Deney Metotları Bölüm 2 Çimentonun Kimyasal Analizi” adlı standart referans alınmıştır. Kızdırma kaybı değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

**Tablo 4.9:** Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin kızdırma kaybı.

| Numune Kodu | Kızdırma Kaybı (%) |
|-------------|--------------------|
| DZ1         | 9,80               |
| DZ2         | 8,78               |
| DZ3         | 11,95              |
| DZ4         | 9,82               |
| DZ5         | 12,06              |
| DZ6         | 16,15              |
| DZ7         | 11,71              |
| DZ8         | 7,14               |
| DZ9         | 12,59              |

Mineral malzemenin kızdırma kaybı büyük ölçüde,  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgCO}_3$  bileşenlerinin  $975\pm 25^\circ\text{C}$ 'ta kızdırma sırasında sıcaklık etkisiyle  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  haline dönüşmesi ve  $\text{CO}_2$  açığa çıkması ile ilişkilidir. Ayrıca, numunenin mineralojik bileşimi de (zeolit veya kil gibi bünyesinde kristal suyu bulunan minerallerle ilişkili olarak) sıcaklık etkisiyle kristal suyu kaybına ve dolayısıyla kızdırma kaybı artışına neden olur. DZ6 kodlu numunenin yüksek kızdırma kaybının, XRF analiz sonuçlarına göre (Tablo 4.6) grup içindeki en yüksek  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  değerlerini sunması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

#### 4.3.4. Fiziksel Deneyler

##### 4.3.4.1. Granüler Doğal Zeolitın Tane Büyüklüğü Dağılımı ve İnce Madde Oranı

Granüler doğal zeolit numunelerinin tane büyüklüğü dağılımı ve ince madde oranı tayini ‘‘BS EN 933-1: 1997 Tests for geometrical properties of aggregates Part 1. Determination of particle size distribution - Sieving method’’ tarafından verilen tarife uygun olarak yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.10’da verilmiştir.

Doğal zeolit numuneleri deneylerde kullanılmak üzere bilyalı değirmende öğütme işlemine tabi tutulduklarından, granüler haldeki tane boyu dağılımı ve ince madde içeriklerinin harç içerisinde katkı olarak bulundukları durumdaki davranışları üzerinde doğrudan bir etkisi olması beklenmemektedir. Bununla birlikte, numunelerin fiziksel

özelliklerini kıyaslayabilmek amacıyla bu parametrelerin ölçülmesinde yarar görülmüştür.

**Tablo 4.10:** Granüler doğal zeolit numunelerinin tane büyüklüğü dağılımı ve ince madde oranı.

| Elek Boyu<br>(mm) | Elekten Geçen (%) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | DZ1               | DZ2  | DZ3  | DZ4  | DZ5  | DZ6  | DZ7  | DZ8  | DZ9  |
| 16                | 100               | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 8                 | 100               | 100  | 100  | 100  | 99,3 | 99,9 | 100  | 100  | 98,5 |
| 4                 | 100               | 100  | 100  | 100  | 80,2 | 98,4 | 98,7 | 99,9 | 67,4 |
| 2                 | 71,3              | 97,5 | 68,0 | 16,7 | 2,4  | 43,7 | 38,8 | 97,8 | 8,3  |
| 1                 | 25,6              | 54,1 | 1,5  | 2,51 | 1,1  | 15,8 | 7,1  | 80,9 | 2,0  |
| 0,5               | 6,9               | 7,3  | 1,1  | 1,75 | 0,8  | 4,0  | 0,9  | 46,6 | 1,2  |
| 0,25              | 4,2               | 3,7  | 0,8  | 1,46 | 0,7  | 1,9  | 0,6  | 10,5 | 1,1  |
| 0,125             | 3,3               | 2,9  | 0,7  | 1,33 | 0,7  | 1,3  | 0,5  | 2,0  | 0,2  |
| İnce Madde<br>(%) | 23,2              | 10,6 | 20,0 | 12,7 | 10,7 | 13,5 | 9,4  | 5,1  | 9,2  |

Tablo 4.10'daki sonuçlar incelendiğinde, granüler numunelerin yıkama yöntemiyle 63µm'lik elekten geçen ince madde miktarının %5,1-23,2 gibi oldukça geniş bir aralıkta bulunduğu görülmektedir. Bu durumun, taşın sertliği ve ocaktaki kırma-eleme-tozsuzlaştırma süreçlerinin farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4.3.4.2. Granüler Doğal Zeolitin Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı

Granüler DZ numunelerinin tane yoğunluğu ve su emme oranı tayininde "TS EN 1097-6 Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini" standardı kullanılmıştır. Tane yoğunluğu ve su emme oranı değerleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

İncelenen numuneler değerlendirildiğinde, tane yoğunluğu 2,32g/cm<sup>3</sup> ve ağırlıkça su emme değeri %5,5 olan DZ8 kodlu Karamürsel (Yalova) doğal zeoliti dışındaki sekiz numunenin, hem tane yoğunluğu (1,78-2,04g/cm<sup>3</sup>) hem de ağırlıkça su emme (%17,0-29,7) değerleri bakımından birbirine daha yakın sonuçlar sergilediği görülmektedir.

**Tablo 4.11:** Granüler doğal zeolit numunelerinin tane yoğunluğu ve su emme oranı.

| Numune Kodu | Numune Tanımı | Tane Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) | Ağırlıkça Su Emme (%) |
|-------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------|
| DZ1         | 1-4mm         | 1,93                                | 18,9                  |
| DZ2         | 1-3mm         | 1,90                                | 22,4                  |
| DZ3         | 1.18-3mm      | 1,78                                | 29,7                  |
| DZ4         | 1-3mm         | 1,91                                | 22,0                  |
| DZ5         | 2-5mm         | 1,99                                | 17,1                  |
| DZ6         | 1-4mm         | 2,04                                | 18,3                  |
| DZ7         | 1-4mm         | 2,00                                | 17,0                  |
| DZ8         | 1-3mm         | 2,32                                | 5,5                   |
| DZ9         | 3-6mm         | 1,81                                | 28,7                  |

Tablo 4.1’de verilen XRD analiz sonuçları incelendiğinde, DZ8 kodlu numunenin %13,3 klinoptilolit oranı ile DZ bileşeni düşük numuneler arasında bulunduğu ve ilaveten ayrışma ürünü illit ve/veya montmorillonit minerali içermediği görülmektedir. Dolayısı ile, DZ8 numunesinin tane yoğunluğu ve su emme bakımından farklı olması, numunenin mineralojik bileşimi ve boşluk yapısı ile ilişkilendirilmiştir.

Granüler haldeki DZ numunelerinin tane boylarının farklı olması, deneye tabi tutulan numunenin özgül yüzeyini ve buna bağlı olarak da su emme değerini etkileyen fiziksel bir unsurdur.

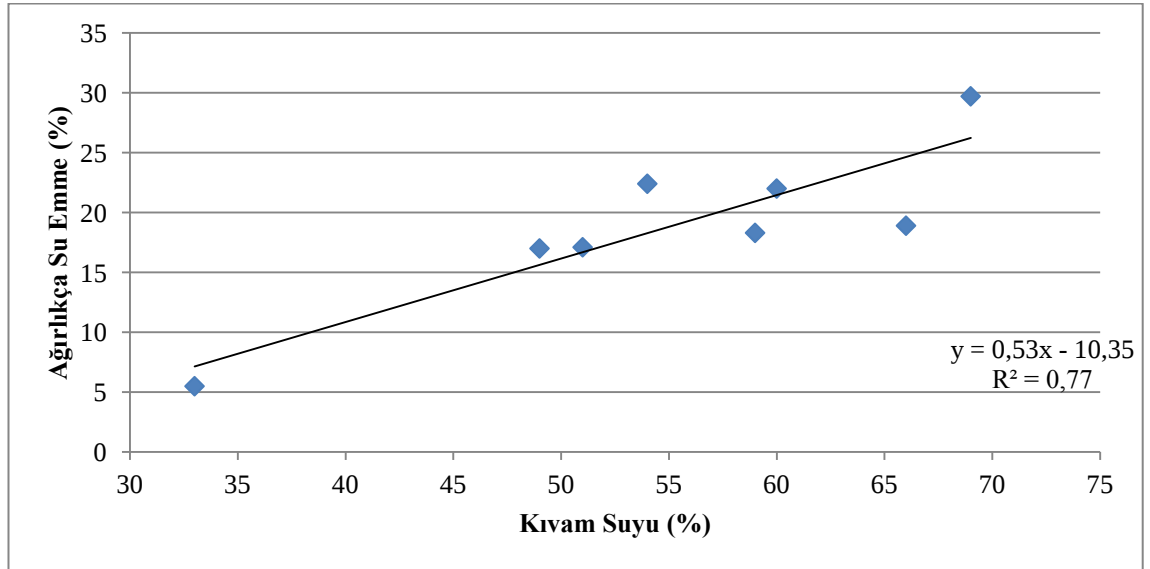
#### 4.3.4.3. Ögütülmüş Doğal Zeolitın Kıvam Suyu

Ögütülmüş doğal zeolit numunelerinin ağırlıkça kıvam suyu tayininde ‘‘TS EN 196-3: Mart 2002 Çimento Deney Metotları Bölüm 3, Priz Süresi ve Genleşme Tayini’’ standardı kullanılmıştır. Karıştırma işlemi numunelerin tamamı için el ile ve mala kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 4.12’de verilmiştir.

Granüler DZ numunelerinin ağırlıkça su emme oranı (Tablo 4.11) ile ÖDZ numunelerinin kıvam suyu ihtiyacı (Tablo 4.12) arasında anlamlı bir ilişki görülmüştür (Şekil 4.12). Numunelerin granülometrik dağılımlarının birbirine daha yakın olması durumunda bu ilişkideki korelasyonun artacağı beklenmektedir.

**Tablo 4.12:** Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin kıvam suyu değeri.

| Numune Kodu | Numunenin Alındığı Yer | Kıvam Suyu (%) |
|-------------|------------------------|----------------|
| DZ1         | Gördes (Manisa)        | 66             |
| DZ2         |                        | 54             |
| DZ3         |                        | 69             |
| DZ4         |                        | 60             |
| DZ5         | Bigadiç (Balıkesir)    | 51             |
| DZ6         |                        | 59             |
| DZ7         |                        | 49             |
| DZ8         | Karamürsel (Yalova)    | 33             |
| DZ9         | Kozaklı (Nevşehir)     | -              |

**Şekil 4.12:** Granüler doğal zeolit numunelerinin ağırlıkça su emme oranı ile öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin kıvam suyu ihtiyacı arasındaki ilişki**4.3.4.4. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Yoğunluk, Özgül Yüzey ve BET Değerleri**

Çalışma kapsamında incelenen doğal zeolit numuneleri bilyalı laboratuvar değirmeninde öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Zeolit numunelerinin farklı yüzey özellikleri ve bunların harçta kullanıldıklarında taze ve sertleşmiş harç özelliklerine muhtemel etkileri nedeniyle, doğal zeolit inceliğinin, çimento ve çimentomsu malzemelerde yaygın kullanılan incelik ölçütü Blaine yerine, çimento üretiminde sıklıkla başvuru alan bir başka ölçüt olan elek bakiyesi ile değerlendirilmesi kararlaştırılmıştır. İnceliğin elek bakiyesi ile takibi, DZ gibi mikroskopik gözenekler içeren bir öğütülmüş hammaddenin

çimentoya veya betona mineral katkı olarak katılması durumunda daha etkin bir kontrol imkanı sunmaktadır. Bu noktadan hareketle, endüstriyel olarak üretilbilme imkanı ve öğütme maliyeti gibi unsurlar da dikkate alınmış ve harç deneylerinde kullanılacak doğal zeolit numunelerinin  $45\mu\text{m}$ 'lik elek bakiyesi  $\%30\pm3$  aralığında kalacak incelikte öğütülmesi hedeflenmiştir (Tablo 3.2).

Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin yoğunluğu ile Blaine ve BET yöntemleri ile ölçülmüş özgül yüzey değerleri Tablo 4.13'te verilmiştir.

**Tablo 4.13:** Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin yoğunluk, Blaine ve BET değerleri.

| Numune Kodu | Numunenin Alındığı Yer | Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) |
|-------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| DZ1         | Gördes (Manisa)        | 2,29                                | 7620                              | 37,8                          |
| DZ2         |                        | 2,29                                | 8960                              | 39,3                          |
| DZ3         |                        | 2,13                                | 10070                             | 43,4                          |
| DZ4         |                        | 2,27                                | 10080                             | 47,1                          |
| DZ5         | Bigadiç (Balıkesir)    | 2,21                                | 13640                             | 23,9                          |
| DZ6         |                        | 2,37                                | 10220                             | 26,6                          |
| DZ7         |                        | 2,24                                | 10670                             | 22,5                          |
| DZ8         | Karamürsel (Yalova)    | 2,38                                | 4680                              | 8,3                           |
| DZ9         | Kozaklı (Nevşehir)     | 2,18                                | 6840                              | 29,8                          |

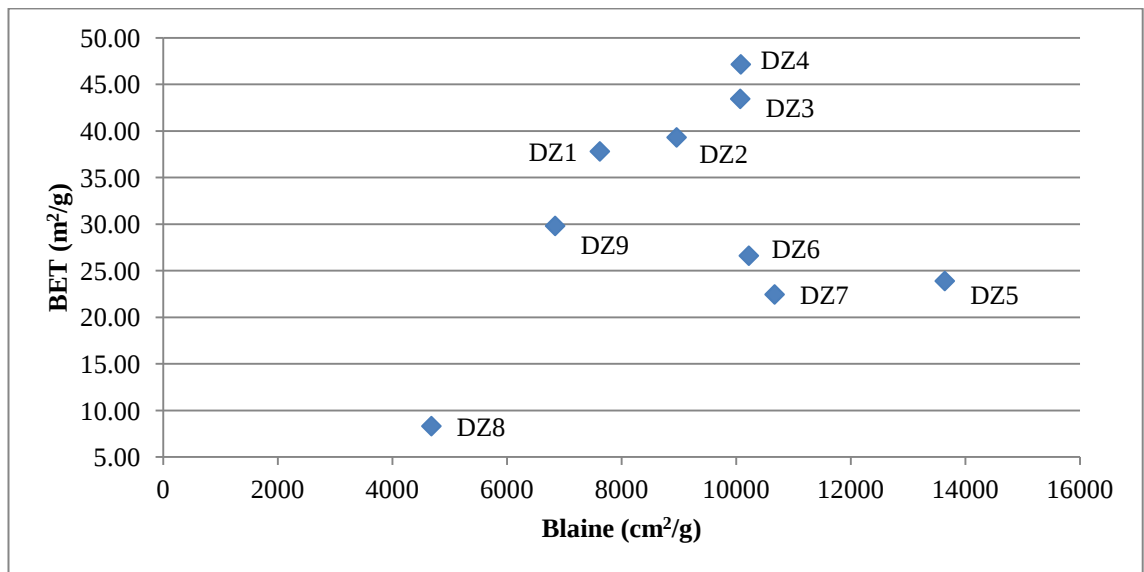
Yoğunluk ve özgül yüzey ölçümünde "TS EN 196-6: Mart 2010 Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 6: İncelik Tayini" standardı kullanılmıştır. Dokuz DZ numunesinin eş değer  $45\mu\text{m}$  elek bakiyesi ile verdikleri Blaine değeri  $4680\text{-}13640\text{cm}^2/\text{g}$  aralığındadır. Blaine yöntemiyle hava permeabilitesi prensibine dayalı (sabit bir hacimdeki havayı numune içerisinden sabit basınçla geçirerek) incelik tayini, başta Kuzey Amerika olmak üzere tüm dünyada çimento inceliğinin ölçümünde yaygın kullanılan hızlı ve basit bir yoldur. Bununla birlikte, yöntemin sadece taneler arasındaki bağlantılı boşlukları hesaba katması, tane boyunun geniş bir yelpazeye dağılması durumunda hassasiyetini yitirmesi gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır ve genel kabul olarak  $5000\text{cm}^2/\text{g}$  üzeri incelikteki ölçümlerin güvenilirliği düşüktür (Ramachandran and Beaudoin, 2001).

BET ölçümünde ise "ISO 9277/2010 Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method" standardına başvurulmuştur. BET yönteminde,

hacmi bilinen ve cam tüp içerisine koyulan numunenin (bu ölçümde ÖDZ numunesi) özgül yüzeyi, bünyesine adsorbe edebildiği azot gazı miktarı ile ilişkilendirilerek hesaplanır. Ölçüm sırasında azot molekülleri numune içerisindeki bağlantısız boşluklara da ulaşabildiği için, ölçülen incelik değerlerinin mertebesi Blaine yöntemindekinden çok daha yüksektir. Özgül yüzeyi Portland çimentosundan yüksek olan toz numunelerde (tipik bir Portland çimentosunun Blaine değeri  $3500-3800\text{cm}^2/\text{g}$  mertebesindedir), ölçüm için daha fazla zamana ihtiyaç duyulmasına rağmen gaz adsorpsiyon yöntemleri tercih edilmektedir (Ramachandran and Beaudoin, 2001). Ölçümde Quantochrome Instruments marka cihaz kullanılmıştır.

Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin BET ölçümleri  $8,3-47,1\text{m}^2/\text{g}$  gibi çok daha geniş bir aralıkta değerler sergilemektedir. Eş değer elek bakiyesi hedefine göre öğütülmüş olmalarına rağmen, DZ numunelerinin Blaine ve BET değerleri arasında tutarlı bir ilişki bulunmamaktadır (Şekil 4.13).

DZ8 kodlu doğal zeolitin diğer numunelerden çok daha düşük mertebedeki BET özgül yüzeyinin, petrografik özellikleri, düşük klinoptilolit içeriği ve ayrışma düzeyi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. İncelenen dokuz DZ numunesi içerisinde sekizi camsı yapıda iken DZ8 kodlu numune kristal dasitik tüf karakterlidir. Ayrıca DZ8 kodlu numune içerisinde ayrışma ile ortaya çıkan illit veya montmorillonit minerallerine de rastlanmamıştır.

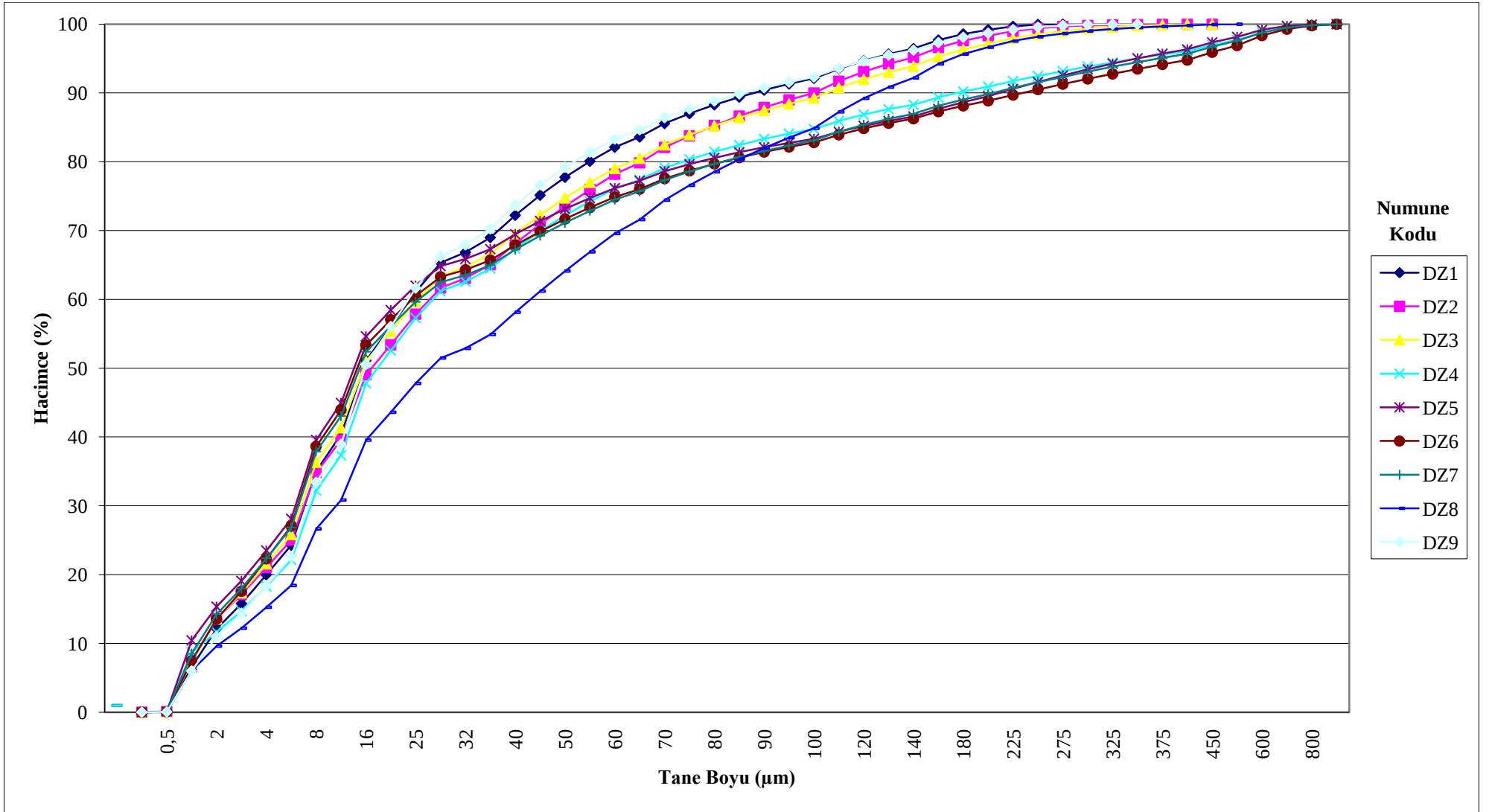


Şekil 4.13: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine ve BET değerleri arasındaki ilişki.

#### **4.3.4.5. Öğütülmüş Doğal Zeolitin Tane Büyüklüğü Dağılımı**

Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin lazer yöntemiyle tayin edilmiş granülometrik dağılımı Şekil 4.14'te sunulmuştur. Lazer difraksiyonu yöntemiyle tane büyüklüğü dağılımının hesaplanması, lazer ışını numune dispersiyonunun içerisinde geçerken meydana gelen ışık dağılımı yoğunluğunun ölçülmesi prensibine dayalıdır. Bu teknikte ölçülen parçacıkların küre olduğu varsayılır ve elde edilen temel büyüklük dağılımı hacim bazlıdır (Ramachandran and Beaudoin, 2001).

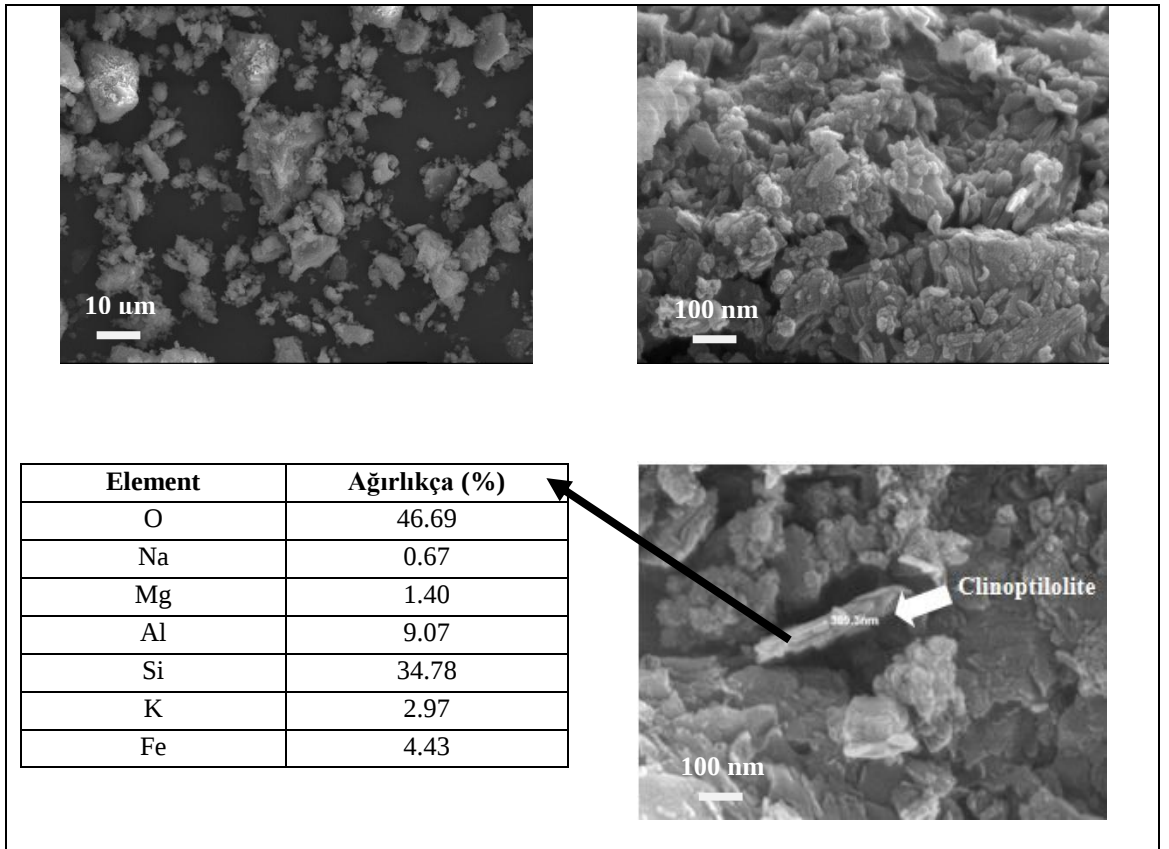
Genel olarak her DZ numunesi, öğütülebilirlikleri farklılaşan değişik minerallerin farklı oranlarda biraraya gelerek oluşturduğu kendine has bir mineralojik yapıdadır. Buna rağmen, Şekil 4.14 incelendiğinde, DZ8 dışındaki ÖDZ numunelerinin tane büyüklüğü dağılımı bakımından genel olarak birbirine paralel bir karakter taşıdığı, özellikle 40µm ve daha ince tanelerin dağılımı dikkate alındığında numuneler arası farkın daha da azaldığı dikkati çekmektedir. Bu farklılaşmanın, DZ8 kodlu numunenin düşük klinoptilolit içeriği ve buna bağlı olarak öğütülmüş tanelerin daha düşük yüzey gözenekliliğinin etkisiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.



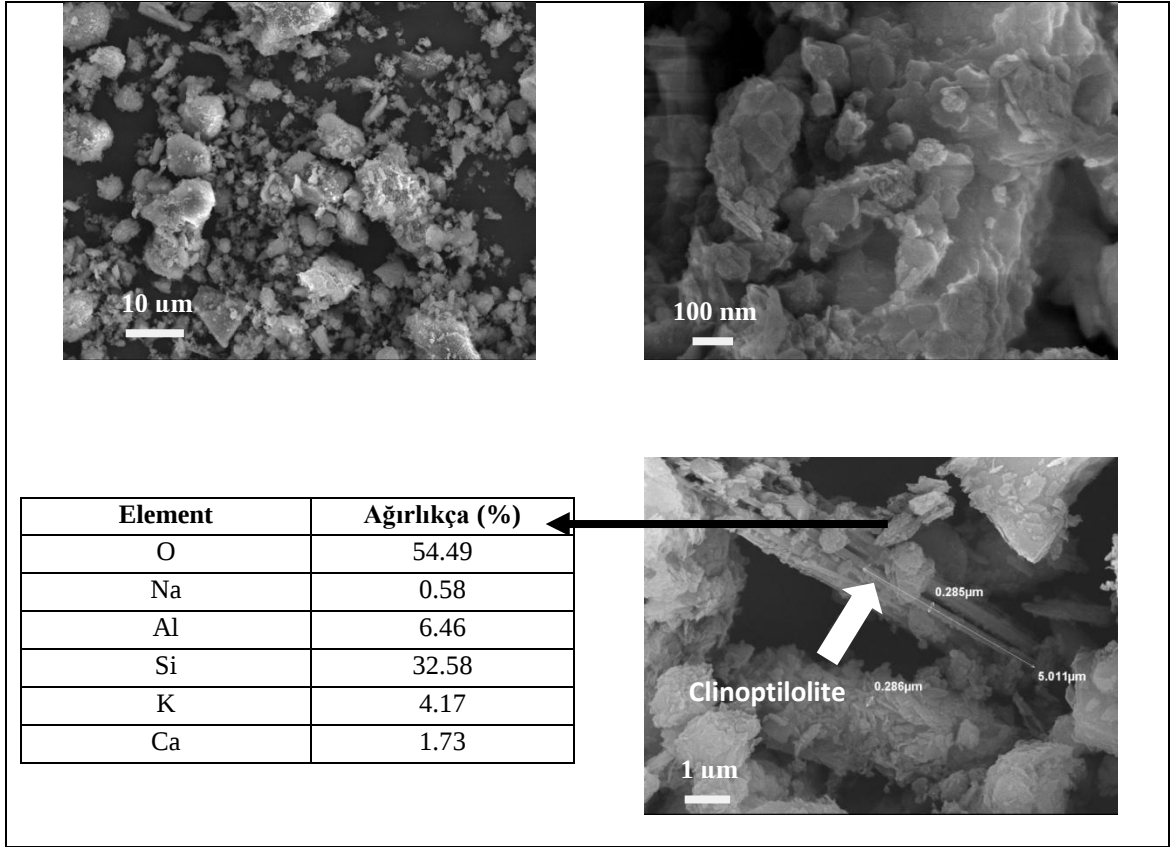
Şekil 4.14: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin tane boyu dağılımı (lazer yöntemi ile).

#### 4.3.5. Öğütülmüş Doğal Zeolit Numunelerinin Mikro Yapısı

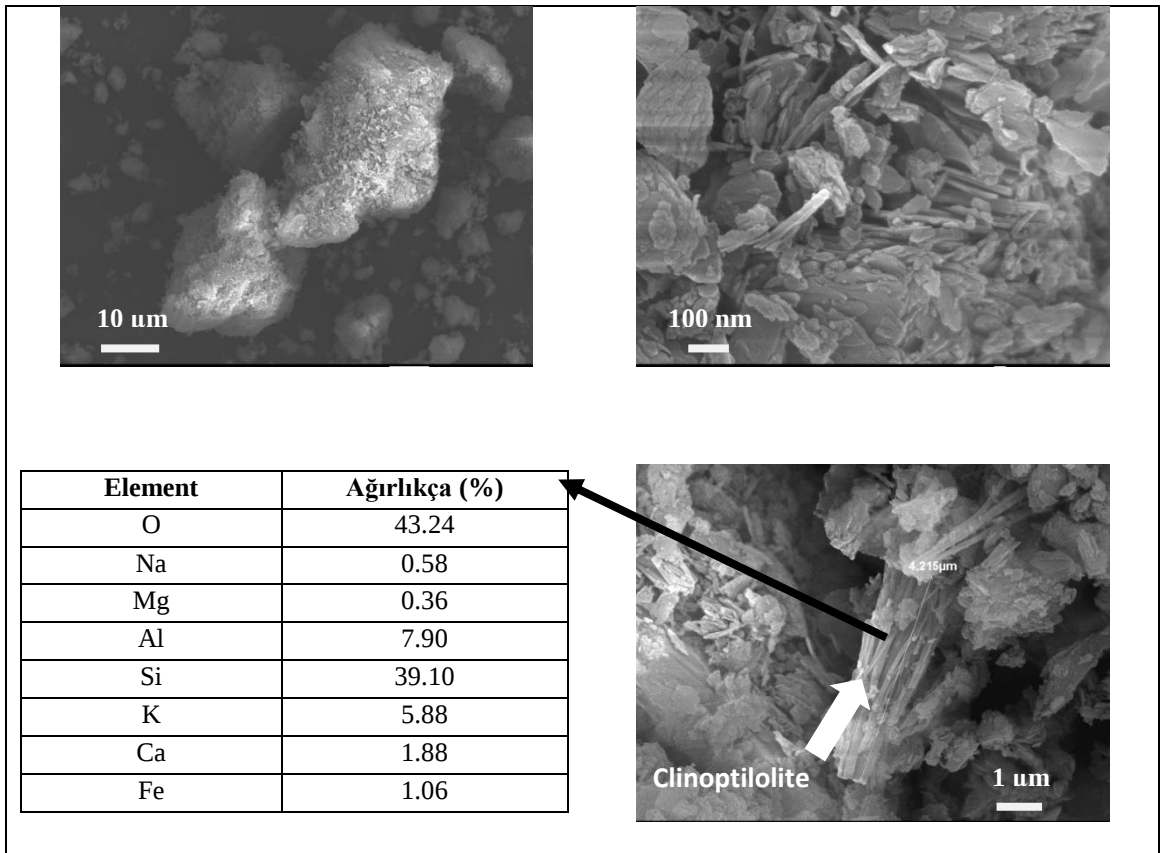
Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin mikroyapı incelemesinde JEOL FEG-SEM JSM-6335F marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Numunelerin X1000, X30000 büyütme ve ölçümlendirilmiş görüntüsü Şekil 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23'te verilmiştir. X30000 büyütme görüntülerde DZ mineraline ait levhamsı yapı açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, numunelerin bileşiminde klinoptilolit mineralinin varlığını ölçümlendirilmiş görüntüler de net olarak ortaya koymaktadır.



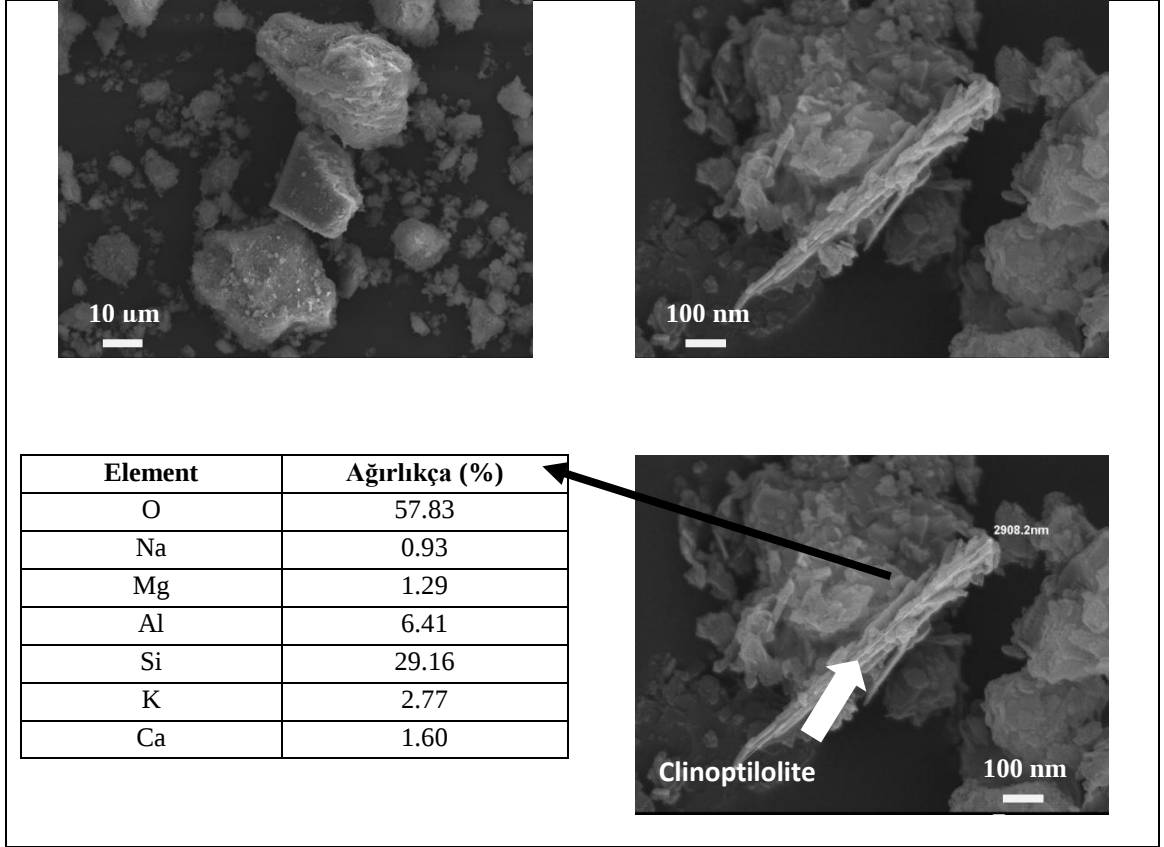
Şekil 4.15: DZ1 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



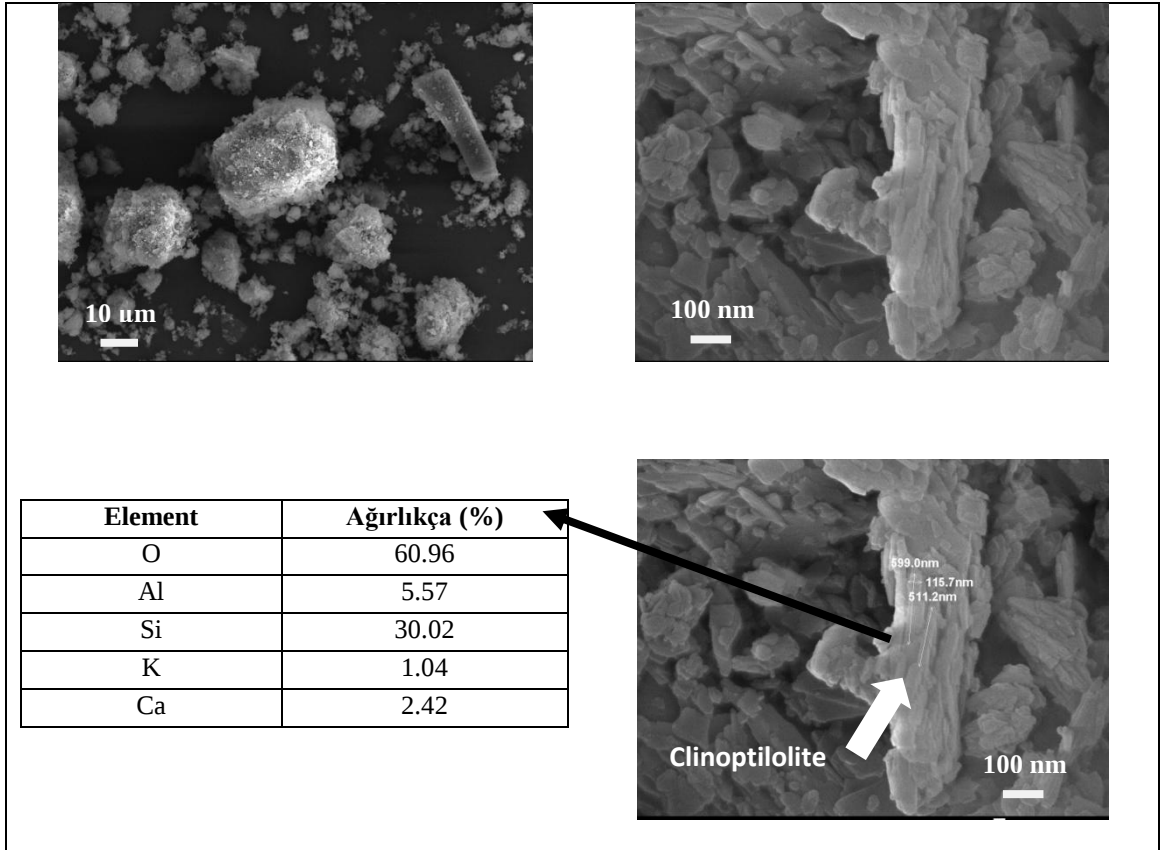
Şekil 4.16: DZ2 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



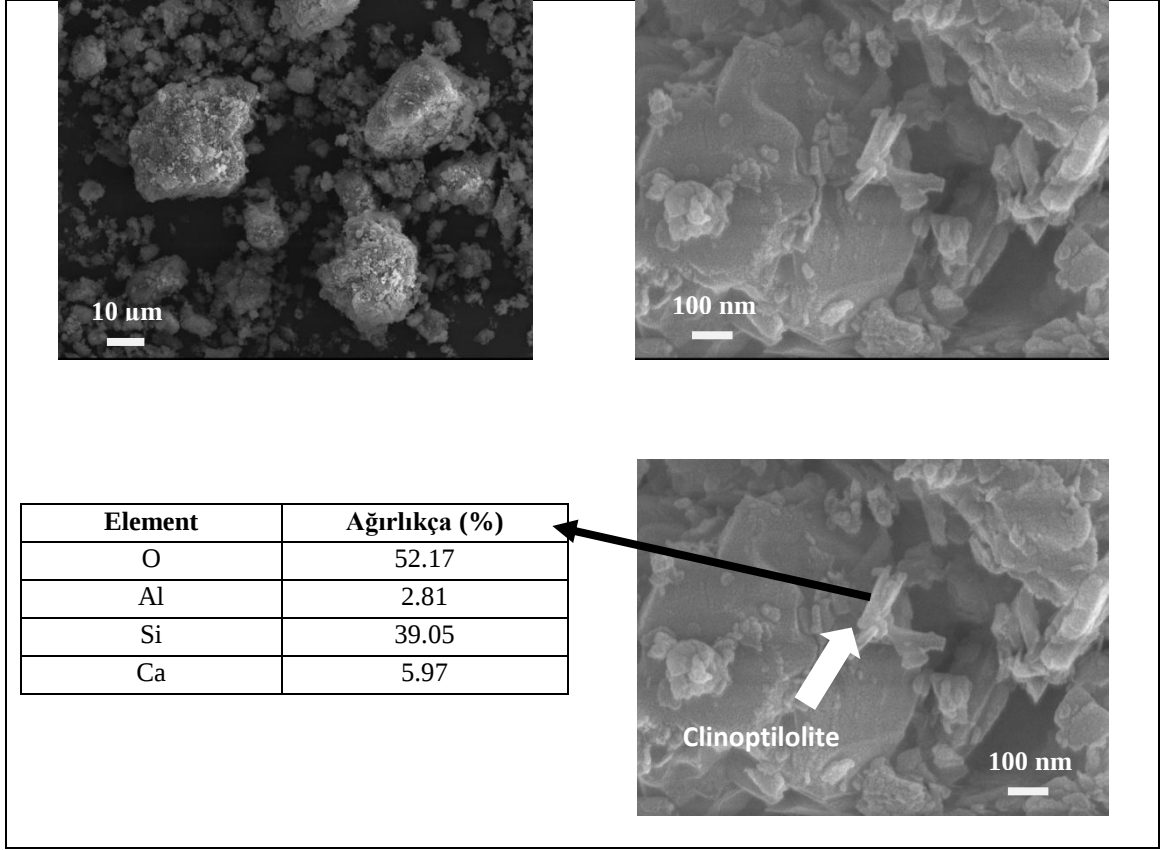
Şekil 4.17: DZ3 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



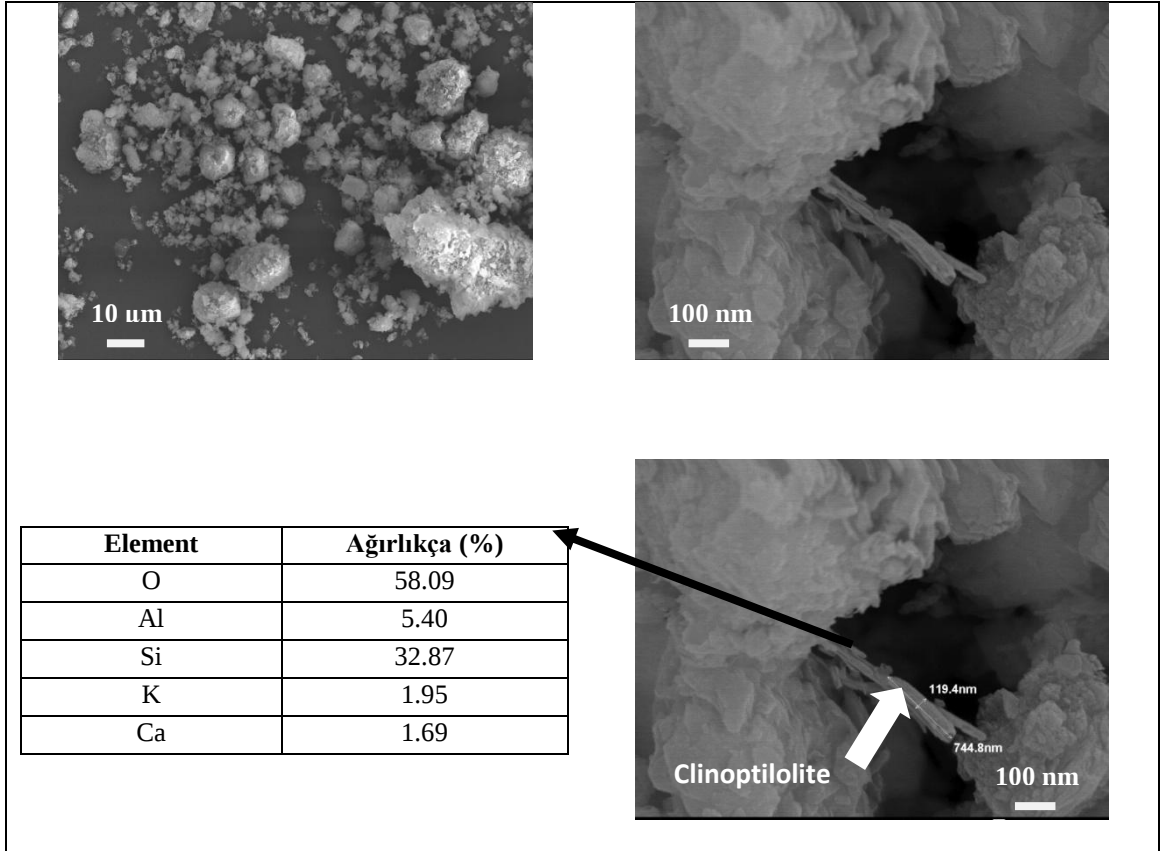
Şekil 4.18: DZ4 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



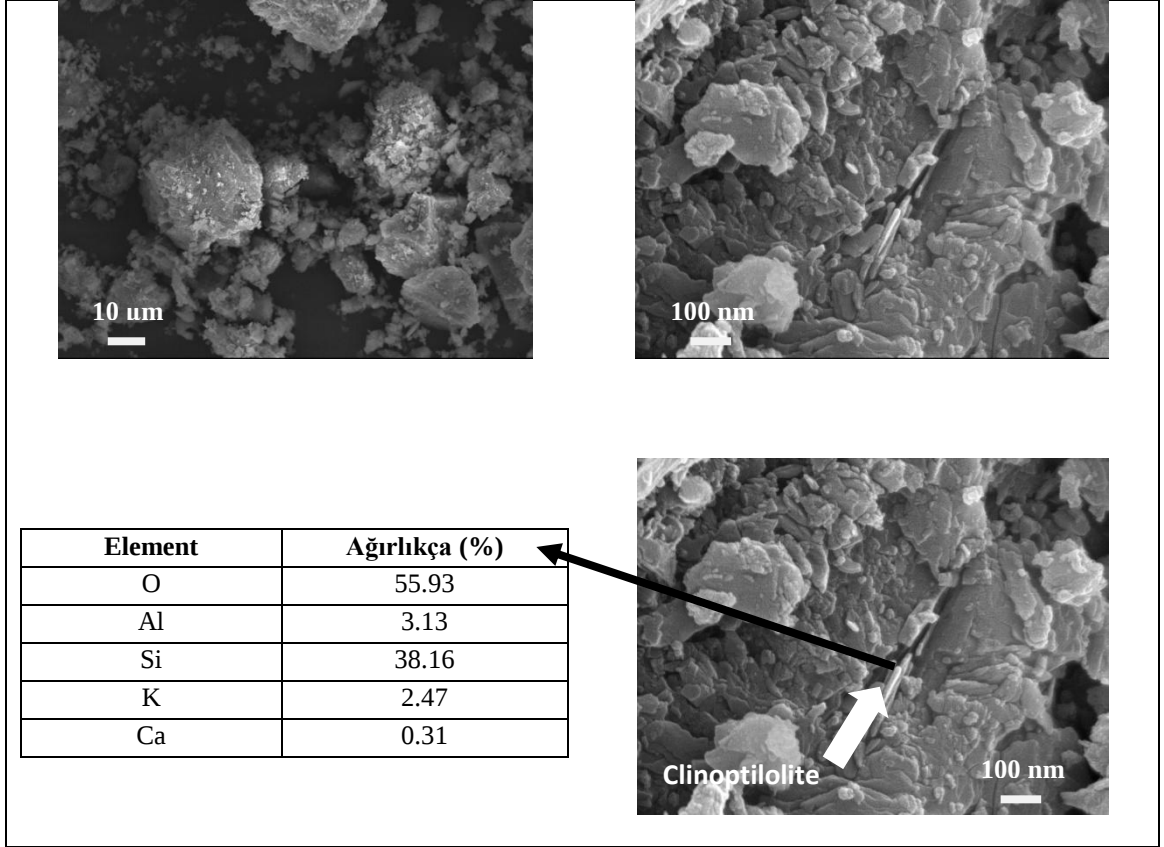
Şekil 4.19: DZ5 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



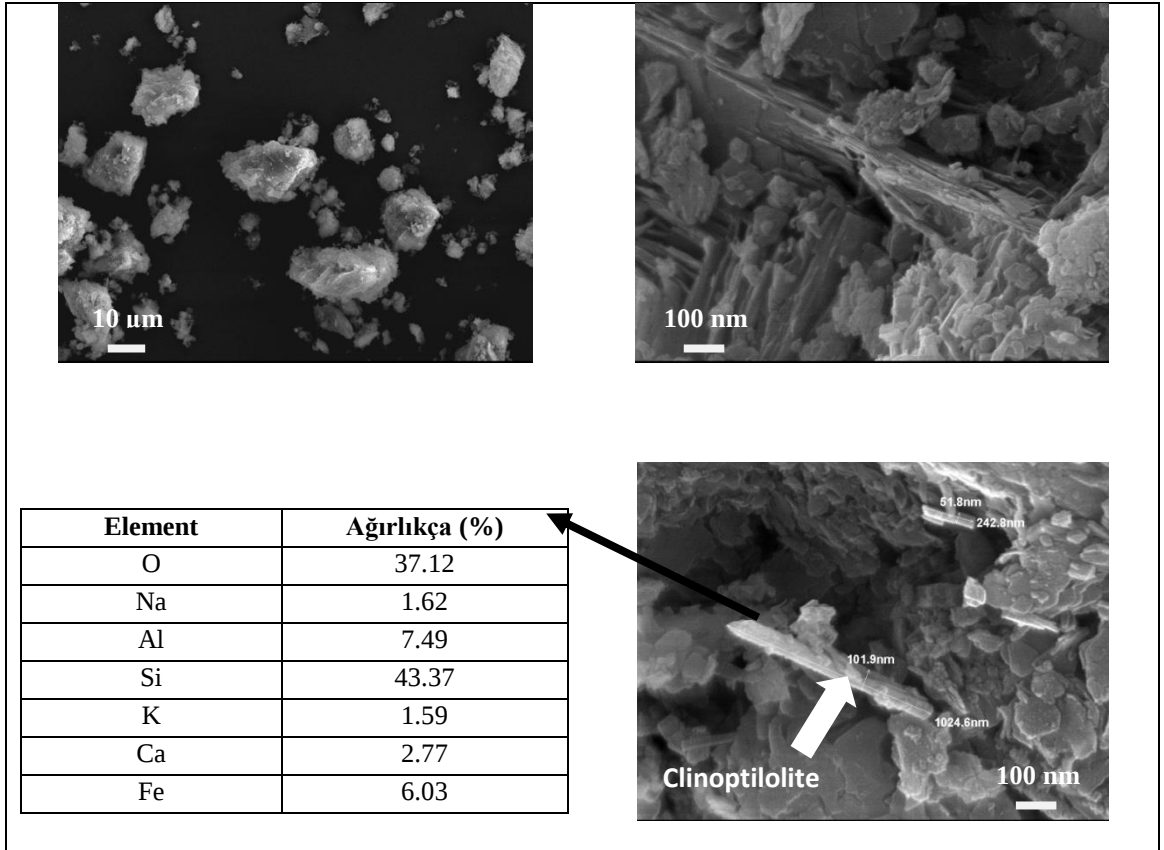
Şekil 4.20: DZ6 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



Şekil 4.21: DZ7 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



Şekil 4.22: DZ8 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.



Şekil 4.23: DZ9 kodlu öğütülmüş numunenin mikro yapısı.

#### 4.4. ÖĞÜTÜLMÜŞ DOĞAL ZEOLİT KATKILI HARÇ DENEYLERİ

##### 4.4.1. Harçlarda Kullanılan Bileşenler

###### 4.4.1.1. Portland Çimentosu

Çalışma kapsamında hazırlanan tüm harç karışımlarında “TS EN 197-1 Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri” standardına uygun CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun analiz raporu Tablo 4.14’te verilmiştir.

**Tablo 4.14:** Deneylerde kullanılan CEM I 42.5R tipi çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

| KİMYASAL ÖZELİKLER (%)         |       | MODÜL HESAPLAMA (%)                |       |
|--------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| Toplam SiO <sub>2</sub>        | 18,90 | C <sub>3</sub> S                   | 56,89 |
| Çözünmeyen Kalıntı             | 0,30  | C <sub>2</sub> S                   | 11,73 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,04  | C <sub>3</sub> A                   | 8,67  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,72  | C <sub>4</sub> AF                  | 8,50  |
| CaO                            | 63,32 | FİZİKSEL ÖZELİKLER                 |       |
| MgO                            | 1,55  | Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,13  |
| SO <sub>3</sub>                | 3,18  | Blaine (cm <sup>2</sup> /g)        | 3560  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,65  | 32µ elek üzeri (%)                 | 8,6   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,14  | 90µ elek üzeri (%)                 | 0,0   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,28  | 200µ elek üzeri (%)                | 0,0   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,18  | Kıvam Suyu (%)                     | 29,5  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,04  | Priz Başı (dk)                     | 220   |
| MnO                            | 0,08  | Priz Sonu (dk)                     | 255   |
| ZnO                            | 0,00  | Le Chatelier (mm)                  | 0,0   |
| SrO                            | 0,12  | Dansite (g/L)                      | 998   |
| Cl <sup>-</sup>                | 0,016 | BASINÇ DAYANIMI (MPa)              |       |
| Kızdırma Kaybı                 | 3,07  | 1 Gün                              | 14,1  |
| Tayin Edilemeyen               | 1,43  | 2 Gün                              | 28,3  |
| Serbest CaO                    | 1,10  | 7 Gün                              | 49,9  |
|                                |       | 28 Gün                             | 59,4  |

#### 4.4.1.2. Öğütülmüş Doğal Zeolit

Bu çalışma kapsamında incelenen DZ numunelerinin karakterizasyonuna yönelik analiz, deney ve inceleme bulguları ayrıntılı olarak Bölüm 4.3'te verilmiştir.

Karakterizasyonu ortaya koyulan dokuz adet granüler DZ numunesi arasından seçilerek ayrıntılı deneylere tabi tutulacak olanların tayininde, öncelikle Bölüm 4.3'te elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Literatürden ulaşılan bilgiler doğrultusunda ve öğütülmüş doğal zeolitin harç içerisinde mineral katkı olarak kullanılması halinde sergileyeceği etkiler görülebilecek şekilde, farklı kimyasal bileşim (özellikle klinoptilolit içeriği), özgül yüzey, reaktif silis içeriği, yüksek puzolanik aktivite ve farklı bölgeleri temsil etme gibi bazı ölçütler dikkate alınmıştır. Bunların dışında, deneyler için kullanılacak mevcut laboratuvar malzeme ve ekipmanı ile deneylerin tamamlanabilmesi için gerekli süre de göz önünde bulundurulmuş, DZ3 (Gördes- Manisa), DZ4 (Gördes- Manisa), ve DZ5 (Bigadiç-Balıkesir) kodlu üç DZ numunesinin ayrıntılı incelenmesi kararlaştırılmıştır (Tablo 4.15).

Dokuz DZ numunesi arasından ayrıntılı deneylere tabi tutulmak üzere seçilen üçü için önemli bir ölçüt, farklı seviyede klinoptilolit oranları ile temsil edilmeleridir. DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numuneler sırasıyla %55,77; %45,71 ve %35,67 oranında klinoptilolit minerali içermektedir (Tablo 4.1).

Seçilen DZ numunelerinin elementel XRF analiz sonuçları Tablo 4.5'te, oksit XRF analiz sonuçları ise Tablo 4.6'da verilmiştir. Tablo 4.6 incelendiğinde, seçilen numunelerin yüksek SiO<sub>2</sub> içeriği (sırasıyla %77,02; %76,92 ve %75,73) özellikle dikkati çekmektedir. Tablo 4.8'den de hatırlanacağı üzere DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numuneler, incelemeye tabi tutulan dokuz numune arasında reaktif silis içeriği (sırasıyla %62,64; %61,74 ve %57,10) bakımından da ilk dört numune arasında yer almaktadır.

DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numunelerin bileşiminde CaO ve K<sub>2</sub>O oranlarının Na<sub>2</sub>O oranından yüksek olması, numunelerin Ca<sup>2+</sup> ve K<sup>+</sup> iyonları bakımından zengin olduğuna işaret etmektedir.

Seçilen DZ numunelerinin puzolanik aktivitesi Tablo 4.7'de verilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi, incelenen dokuz doğal zeolit birbirine yakın puzolanik aktivite karakteri sergilemektedir. DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numuneler sırasıyla 11,9MPa;

12,8MPa ve 11,5MPa dayanım değerleriyle puzolanik aktivite davranışı birbirine oldukça yakın numunelerdir.

Seçilen ÖDZ numunelerinin kıvam suyu değerleri Tablo 4.12’de, Blaine ve BET değerleri Tablo 4.13’te verilmiştir. Gördes (Manisa) kökenli DZ3 ve DZ4 kodlu numuneler her üç parametrede de birbirine daha yakın değerler sergilerken, Bigadiç (Balıkesir) kökenli DZ5 kodlu numune yüksek Blaine özgül yüzeyine karşılık daha düşük BET ve su ihtiyacı ile dikkat çekmektedir. Blaine ve BET karakterleri birbirine yakın DZ3 ve DZ4 kodlu numuneler ile, diğerlerinden daha yüksek Blaine ve buna rağmen daha düşük BET değeri veren DZ5’in BET incelikleri arasındaki mertebe farkı, DZ5 kodlu numuneye kıyasla DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerde azot gazının nüfuz edebileceği daha fazla miktarda bağlantısız boşluk bulunduğu şeklinde yorumlanmıştır. DZ5 kodlu numunenin diğer iki numuneye kıyasla daha yüksek olan tane yoğunluğu ve daha düşük olan su emme değerleri de bu tespiti desteklemektedir (Tablo 4.11).

Doğal zeolit numunelerinin yaş analizi Tablo 4.3’te verilmiştir. “TS 25 Doğal Puzolan (Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri” isimli standardın bazı parametreler için tanımladığı sınır değerler Tablo 4.4’te verilmiştir. Tablodan görülebileceği üzere, seçilen DZ numuneleri TS 25 tarafından tanımlı bu şartları yerine getirmektedir.

Seçilen üç DZ numunesine ait tüm veriler toplu olarak Tablo 4.15’te sunulmuştur.

**Tablo 4.15:** Seçilen doğal zeolit numunelerinin genel özellikleri.

| Numune Kodu                              |                                | DZ3             | DZ4             | DZ5                 |
|------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Numunenin Alındığı Yer                   |                                | Gördes (Manisa) | Gördes (Manisa) | Bigadiç (Balıkesir) |
| <b>Mineralojik Fazlar (XRD) (%)</b>      | Klinoptilolit                  | 55,77           | 45,71           | 35,67               |
|                                          | Feldspat                       | 24,03           | 28,57           | 12,86               |
|                                          | Kuvars                         | 15,38           | 20,95           | 49,12               |
|                                          | İllit                          | 4,82            | 4,77            | 2,35                |
| <b>Oksitler (XRF) (%)</b>                | SiO <sub>2</sub>               | 77,02           | 76,92           | 75,73               |
|                                          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,53           | 13,56           | 13,27               |
|                                          | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,22            | 1,24            | 1,29                |
|                                          | CaO                            | 3,64            | 2,08            | 4,11                |
|                                          | MgO                            | 1,54            | 1,43            | 1,79                |
|                                          | SO <sub>3</sub>                | 0,03            | 0,04            | 0,06                |
| <b>Kimyasal Bileşim (Yaş Analiz) (%)</b> | Çöz. Kalıntı                   | 5,76            | 15,00           | 11,11               |
|                                          | Toplam SiO <sub>2</sub>        | 66,94           | 72,23           | 66,06               |
|                                          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10,51           | 10,55           | 11,32               |
|                                          | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,16            | 2,35            | 1,26                |
|                                          | CaO                            | 1,28            | 1,34            | 1,35                |
|                                          | MgO                            | 2,49            | 1,57            | 3,14                |
|                                          | SO <sub>3</sub>                | Eser Miktar     | Eser Miktar     | Eser Miktar         |
|                                          | Reaktif Silis                  | 62,64           | 61,74           | 57,10               |
|                                          | Cl <sup>-</sup>                | 0,004           | 0,003           | 0,005               |
| <b>Kızdırma Kaybı (%)</b>                |                                | 11,95           | 9,82            | 12,06               |
| <b>Puzolanik Aktivite (7gün, MPa)</b>    |                                | 11,9            | 12,8            | 11,5                |
| <b>İncelik</b>                           | Blaine (cm <sup>2</sup> /g)    | 10070           | 10080           | 13640               |
|                                          | 45µm Elek Bakiyesi (%)         | 30,5            | 27,5            | 31,0                |
|                                          | BET (m <sup>2</sup> /g)        | 43,4            | 47,1            | 23,9                |
| <b>Kıvam Suyu (%)</b>                    |                                | 69              | 60              | 51                  |

#### 4.4.1.3. Kum

Çalışma kapsamındaki deneylerden, “ASTM C-1567-08 Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)” deneyi dışındaki tüm harç karışımlarında CEN (Comité Européen de Normalisation) standart kumu (TS EN 196-

1'e uygun) kullanılmıştır. Standart kumun özellikleri Tablo 4.16'da verilmiştir. ASR potansiyelinin değerlendirilmesi deneyi için hazırlanan prizmalarda ise özellikleri Tablo 4.17'de verilen kum kullanılmıştır.

**Tablo 4.16:** Deneylerde kullanılan TS EN 196-1'e uygun standart kumun özellikleri.

| <b>ELEK BAKİYESİ</b>       |                                 |                             |
|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| <b>Elek Boyu<br/>(mm)</b>  | <b>Kümülatif Kalan*<br/>(%)</b> | <b>Deney Sonucu<br/>(%)</b> |
| 2,00                       | 0                               | 0,00                        |
| 1,60                       | 7±5                             | 5,90                        |
| 1,00                       | 33±5                            | 32,66                       |
| 0,50                       | 67±5                            | 66,25                       |
| 0,16                       | 87±5                            | 86,83                       |
| 0,08                       | 99±1                            | 99,01                       |
| * TS EN 196-1'e göre sınır |                                 |                             |
| <b>Rutubet (%)</b>         | 0,09                            |                             |

| <b>KİMYASAL ANALİZ (%)</b>                                           |       |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>                                               | 93,96 |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                                   | 4,71  |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                                   | 0,39  |
| <b>CaO</b>                                                           | 0,59  |
| <b>MgO</b>                                                           | 0,00  |
| <b>SO<sub>3</sub></b>                                                | 0,04  |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>                                                | 2,21  |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>                                               | 0,57  |
| <b>Kızdırma Kaybı</b>                                                | 0,62  |
| <b>Özgül Ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)<br/>(Suya doymun yüzey kuru)</b> |       |
|                                                                      | 2650  |

**Tablo 4.17:** ASR deneyinde kullanılan kumun özellikleri.

| <b>ELEK ANALİZİ</b> (TS 3530 EN 933-1'e göre)                                         |             |           |          |          |          |          |            |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|------------|-------------|
| <b>Elek Boyu<br/>(mm)</b>                                                             | <b>31,5</b> | <b>16</b> | <b>8</b> | <b>4</b> | <b>2</b> | <b>1</b> | <b>0,5</b> | <b>0,25</b> |
| <b>Elekten Geçen<br/>(%)</b>                                                          | 100         | 100       | 100      | 95       | 81       | 65       | 44         | 12,1        |
| <b>Agrega Tane Sınıfı:</b> d/D= 0/4mm (temel elek serisi, kategori G <sub>F</sub> 85) |             |           |          |          |          |          |            |             |

**ÖZGÜL AĞIRLIK, SU EMME ve GEVŞEK BİRİM AĞIRLIK**  
(TS EN 1097-6 ve TS EN 1097-3'e göre)

| <b>Agrega Cinsi</b> | <b>Suya Doymuş<br/>Yüzey Kuru Özgöl<br/>Ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Ağırlıkça Su<br/>Emme (%)</b> | <b>Gevşek Birim<br/>Ağırlık<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Doğal Kum           | 2580                                                                   | 1,9                              | 1530                                                   |

**İNCE MADDE ORANI** (TS 3527 esaslarına göre)

| <b>Agrega Cinsi</b> | <b>Ağırlıkça İnce<br/>Madde Oranı (%)</b> | <b>Kategori</b> |
|---------------------|-------------------------------------------|-----------------|
| Doğal Kum           | 0,7                                       | f <sub>3</sub>  |

**METİLEN MAVİSİ** (TS EN 933-9'a göre) : 0,51 g/kg

**KUM EŞDEĞERLİĞİ** (TS EN 933-8'e göre): SE= %82

**ORGANİK MADDE** (TS EN 1744-1'e göre): Renksiz

**DONMA-ÇÖZÜLME DİRENCİ** (MgSO<sub>4</sub> çözeltisi ile, TS EN 1367-2'ye göre)

| <b>Agrega Cinsi</b> | <b>Geçen Elek<br/>Açıklığı<br/>(mm)</b> | <b>Kalan Elek<br/>Açıklığı<br/>(mm)</b> | <b>Deneyden<br/>Sonra İnce<br/>Elekten<br/>Geçen<br/>(%)</b> | <b>Granülometri<br/>(%)</b> | <b>Düzeltilmiş<br/>Kayıp<br/>(%)</b> |
|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Doğal Kum           | 1,18                                    | 0,59                                    | 10,7                                                         | 50                          | 5,4                                  |
|                     | 0,59                                    | 0,30                                    | 8,4                                                          | 50                          | 4,2                                  |

Not: Kategori MS18

| <b>MİNERALOGİK ve PETROGRAFİK ANALİZ</b>                            |                 |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Mineral / Bileşen</b>                                            | <b>Oran (%)</b> |
| Kuvars (renksiz, beyaz, sarı, bordo, yeşil tonlarda, saydam ve mat) | 77-82           |
| Feldspat                                                            | 6-8             |
| Muskovit                                                            | 1               |
| Gröna                                                               | 0,5-1           |
| Manyetit + Hematit                                                  | 0,5'ten az      |
| Klorit + Epidot                                                     | 0,5'ten az      |
| Piroksen + Amfibol                                                  | 0,5-1           |
| Rutil                                                               | <0,5            |
| Zirkon                                                              | <0,5            |
| Çakıl (metamorfik ve sedimenter kayaç parçaları)                    | 10-12           |

| <b>KİMYASAL ÖZELİKLER (TS EN 1744-1'e göre)</b> |   |         |                            |
|-------------------------------------------------|---|---------|----------------------------|
| Klorür (Cl)                                     | % | 0,00065 |                            |
| Sülfat (SO <sub>4</sub> )                       | % | 0,009   | Kategori AS <sub>0,2</sub> |
| Kükürt (S)                                      | % | 0,003   | Kategori AS <sub>0,2</sub> |

|                                                             |          |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| <b>ALKALİ-AGREGA REAKTİVİTESİ DENEYİ (TS 2517'ye göre):</b> | Zararsız |
|-------------------------------------------------------------|----------|

#### 4.4.1.4. Şebeke Suyu

Çalışma kapsamında hem üretilen harçların bileşiminde karma suyu olarak ve hem de numunelerin kürlenmesinde şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

#### 4.4.2. Deney Kapsamı ve Temel İlkeler

Seçilen deney programının amacı, mineral katkı olarak kullanılan öğütülmüş doğal zeolitin taze ve sertleşmiş harç özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Harçların hazırlanmasında “TS EN 196-1 Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım” standardı referans alınmıştır.

Çalışmada yüksek çimento dozlu-düşük S/Ç oranlı (YD serisi) ve düşük çimento dozlu-yüksek S/Ç oranlı (DD serisi) olmak üzere iki ayrı harç serisi üretilmesi

kararlaştırılmıştır. Dayanımları ve kompasiteleri birbirinden farklı iki ayrı harç serisi ile çalışılmasının hedefi, DZ katkısının taze ve sertleşmiş harç özellikleri üzerindeki etkilerinin daha net görülebilmesidir. Yüksek dozlu serideki referans harç için her harmanda TS EN 196-1’de standart harç için tarif edildiği gibi 450g imento kullanılmıştır. Düşük dozlu serideki referans harcın imento miktarı ise 360g seçilmiştir.

Öğütülmüş doğal zeolit çimentoya ağırlıkça ikame edilmiş, ancak doğal zeolitın özgül ağırlığının çimentonunkinden düşük olması nedeniyle karışımın toplam hacminde ortaya çıkan artış, standart kum miktarı azaltılarak düzeltilmiştir. Karışımların hacmi sabit tutulmak suretiyle, referans ve değişik oranda DZ içeren harç karışımlarının performanslarını bire bir kıyaslayabilme imkanı elde edilmesi hedeflenmiştir.

#### **4.4.3. Harç Bileşiminin Belirlenmesi**

DZ3, DZ5 ve DZ9 kodlu numunelerle, çalışma kapsamında üretilecek harçların kıvamının değişik oranlarda DZ ilavesi ile nasıl değişeceğini görebilmek ve bu bulgular doğrultusunda nihai karışımlar için uygun S/ oranı ile ikame DZ miktarı kademelerini belirlemek amacıyla bir n çalışma yapılmıştır. Bu aşamada üretilen harçlar, ikame edilen DZ dışında, bileşim de dahil olmak üzere ‘‘TS EN 196-1 imento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım’’ esaslarına göre hazırlanmıştır. Referans harç karışımına ilaveten, imento miktarı %10 ve %20 oranlarında azaltılarak DZ katkılı karışımlar hazırlanmıştır. Bileşimden ağırlıkça eksiltilen imentonunkine eşit hacimde DZ ikame edilerek imento ve zeolitın özgül ağırlık farkları nedeniyle karışımda hacim artışı ortaya çıkması nlenmiştir. Referansla birlikte toplam yedi harç karışımı üretilmiştir. Taze harcın yayılması ‘‘ASTM C230-08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement’’ standardına göre ölçülmüştür. Deney sonuçları Tablo 4.18’de toplu olarak verilmektedir. Tablo 4.18’deki ortalama basınç dayanımı değerlerinden 1 gün ve 7 gün sonuçları tek harç prizması, 2 gün ve 28 gün sonuçları ise iki harç prizması ile hesaplanmıştır.

**Tablo 4. 18:** Ögütülmüş doğal zeolit katkılı harç deneyleri (ön deneyler).

| Numune Kodu | CEM I 42.5R |     |                              | Doğal Zeolit |                              |      | Standart Kum (g) | Su (g) | Karışım Hacmi (cm <sup>3</sup> ) | Yayılma* (cm)         | Basınç Dayanımı (MPa) |      |      |       |
|-------------|-------------|-----|------------------------------|--------------|------------------------------|------|------------------|--------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------|------|-------|
|             | (%)         | (g) | Öz. Ağ. (g/cm <sup>3</sup> ) | (%)          | Öz. Ağ. (g/cm <sup>3</sup> ) | (g)  |                  |        |                                  |                       | 1gün                  | 2gün | 7gün | 28gün |
| Referans    | 100         | 450 | 3,09                         | -            | -                            | -    | 1350             | 225    | 880,1                            | 16,5                  | 13,1                  | 24,8 | 45,7 | 60,7  |
| DZ3         | 90          | 405 | 3,09                         | 10           | 2,13                         | 31,0 | 1350             | 225    | 880,1                            | 14                    | 10,8                  | 20,5 | 40,8 | 57,8  |
|             | 80          | 360 | 3,09                         | 20           | 2,13                         | 62,0 | 1350             | 225    | 880,1                            | Ölçülemedi (çok kuru) | 9,3                   | 17,4 | 35,4 | 53,2  |
| DZ5         | 90          | 405 | 3,09                         | 10           | 2,21                         | 32,2 | 1350             | 225    | 880,1                            | 15,7                  | 11,0                  | 20,5 | 41,1 | 58,8  |
|             | 80          | 360 | 3,09                         | 20           | 2,21                         | 64,4 | 1350             | 225    | 880,1                            | 14,5                  | 9,5                   | 17,7 | 36,9 | 57,4  |
| DZ9         | 90          | 405 | 3,09                         | 10           | 2,18                         | 31,7 | 1350             | 225    | 880,1                            | 13,7                  | 12,1                  | 21,3 | 41,3 | 56,3  |
|             | 80          | 360 | 3,09                         | 20           | 2,18                         | 63,5 | 1350             | 225    | 880,1                            | 10,8                  | 9,5                   | 18,4 | 35,4 | 50,0  |

\* ASTM C 230-08'e göre

Bu ön çalışmada taze harçta ölçülen yayılma değerleri, öğütülmüş doğal zeolitin kaynağına ve karışım içerisinde çimentoya ikame oranına bağlı olarak, TS EN 196-1’de tariflenen standart harç bileşimi ile numuneleri boşluksuz bir şekilde yerleştirmeye yeterli olacak kıvama ulaşamadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, nihai karışımlarda daha yüksek S/Ç oranı ile çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ön çalışmada üretilen harçlarda, yüksek oranda DZ katkısı içeren karışımların kuru kıvamı, kalıba yerleştirirken yeterli kompasiteye ulaşmamış prizma numunelerinde (kıvamı ne olursa olsun tüm harçların kalıba yerleştirilmesinde TS EN 196-1’de tariflenen yöntem uygulanmıştır), yerleşme kusurlarından doğan ve ÖDZ miktarındaki artışa bağlı olarak elde edilmesi beklenenden daha düşük basınç dayanımı değerleri ölçülmesine neden olmuştur. Bu durum, ÖDZ katkısının dayanım gelişimine etkisinin tam olarak değerlendirilebilmesini zorlaştırmıştır.

Dokuz adet DZ numunesi arasından ayrıntılı deneyler için seçilen üç numune (DZ3, DZ4 ve DZ5) ile yürütülen taze ve sertleşmiş harç deneylerinde, ön deneylerde elde edilen veriler doğrultusunda S/Ç oranı artırılmıştır. ÖDZ çimentoya %12, %24 ve %36 olmak üzere üç kademedede ikame edilmiştir. Ancak YD serisi harçlar üretilirken %36 oranında ÖDZ ikame edilmiş harçların kıvamının beklenenden oldukça kuru çıkması üzerine, deney programına sadece YD serisi için %18 DZ içeren bir ara kademe daha eklenmiştir. Bu sayede, çok kuru kıvam sebebiyle kalıba yeterince boşluksuz yerleştirilememe ve sonuçta düşük kompasiteli iç yapısı nedeniyle temsili performans sergileyememe riski taşıyan %36 ÖDZ katkılı karışımları değerlendirme dışında tutmak zorunluluğu doğsa bile, YD serisi harçların genel davranışını da DD serisi harçlar gibi 3 ayrı ikame DZ kademesi ile yorumlayabilme imkanı elde edilmesi hedeflenmiştir.

Ön deneylerdeki harç bileşiminin (Tablo 4.18) hesaplanmasında izlenen yoldan farklı olarak, nihai deneylere yönelik hazırlanan harçların bileşiminin hesaplanmasında, günümüzde puzolanik katkıları içeren beton bileşimlerinde yaygın kullanılan yaklaşım tercih edilmiştir. İlke olarak, ÖDZ içeren karışımlarda çimentonun referansa kıyasla bir miktar eksiltilmesi ve çimentoya değişik oranlarda ÖDZ ikame ederek hazırlanmış bileşim alternatiflerinin performansının referans harcinkıyla kıyaslanması hedeflenmiştir. YD ve DD serilerinin ÖDZ içeren harçlarında, referans bileşimin çimento miktarı %12 azaltılmış ve bu %12’lik çimentoya karşılık karışıma %12, %18,

%24 ve %36 oranlarında ÖDZ eklenerek taze ve sertleşmiş harcın davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Ayrıntılı deneyler için üretilen YD ve DD serilerine ait, referans ve ÖDZ katkılı tüm harçların bileşimi Tablo 4.19’da özet halinde verilmektedir.

**Tablo 4.19:** Referans ve öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların bileşimi.

| Yüksek Dozlu Harç Serisi |       |     |              |     |                  |        |                    |             | Düşük Dozlu Harç Serisi |     |              |     |                  |        |                    |             |
|--------------------------|-------|-----|--------------|-----|------------------|--------|--------------------|-------------|-------------------------|-----|--------------|-----|------------------|--------|--------------------|-------------|
| Doğal Zeolit Kodu        | CEM I |     | Doğal Zeolit |     | Standart Kum (g) | Su (g) | Su/Çimento+ÖDZ (%) | Karışım No  | CEM I                   |     | Doğal Zeolit |     | Standart Kum (g) | Su (g) | Su/Çimento+ÖDZ (%) | Karışım No  |
|                          | (%)   | (g) | (%)          | (g) |                  |        |                    |             | (%)                     | (g) | (%)          | (g) |                  |        |                    |             |
| -                        | 100   | 450 | -            | -   | 1350             | 260    | 0,578              | YD-Referans | 100                     | 360 | -            | -   | 1426             | 260    | 0,722              | DD-Referans |
| DZ 3                     | 88    | 396 | 12           | 54  | 1329             | 260    | 0,578              | YD-DZ3-12   | 88                      | 317 | 12           | 43  | 1409             | 260    | 0,722              | DD-DZ3-12   |
|                          | 88    | 396 | 18           | 81  | 1295             | 260    | 0,545              | YD-DZ3-18   | -                       | -   | -            | -   | -                | -      | -                  | -           |
|                          | 88    | 396 | 24           | 108 | 1262             | 260    | 0,516              | YD-DZ3-24   | 88                      | 317 | 24           | 86  | 1355             | 260    | 0,645              | DD-DZ3-24   |
|                          | 88    | 396 | 36           | 162 | 1195             | 260    | 0,466              | YD-DZ3-36   | 88                      | 317 | 36           | 130 | 1301             | 260    | 0,582              | DD-DZ3-36   |
|                          | 88    | 396 | 12           | 54  | 1333             | 260    | 0,578              | YD-DZ4-12   | 88                      | 317 | 12           | 43  | 1412             | 260    | 0,722              | DD-DZ4-12   |
| DZ 4                     | 88    | 396 | 18           | 81  | 1301             | 260    | 0,545              | YD-DZ4-18   | -                       | -   | -            | -   | -                | -      | -                  | -           |
|                          | 88    | 396 | 24           | 108 | 1270             | 260    | 0,516              | YD-DZ4-24   | 88                      | 317 | 24           | 86  | 1362             | 260    | 0,645              | DD-DZ4-24   |
|                          | 88    | 396 | 36           | 162 | 1207             | 260    | 0,466              | YD-DZ4-36   | 88                      | 317 | 36           | 130 | 1311             | 260    | 0,582              | DD-DZ4-36   |
|                          | 88    | 396 | 12           | 54  | 1332             | 260    | 0,578              | YD-DZ5-12   | 88                      | 317 | 12           | 43  | 1411             | 260    | 0,722              | DD-DZ5-12   |
| DZ 5                     | 88    | 396 | 18           | 81  | 1299             | 260    | 0,545              | YD-DZ5-18   | -                       | -   | -            | -   | -                | -      | -                  | -           |
|                          | 88    | 396 | 24           | 108 | 1267             | 260    | 0,516              | YD-DZ5-24   | 88                      | 317 | 24           | 86  | 1359             | 260    | 0,645              | DD-DZ5-24   |
|                          | 88    | 396 | 36           | 162 | 1202             | 260    | 0,466              | YD-DZ5-36   | 88                      | 317 | 36           | 130 | 1307             | 260    | 0,582              | DD-DZ5-36   |

YD ve DD serisi referans harçların 1m<sup>3</sup> için bileşimi Tablo 4.20’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.20:** Referans harçların bileşimi.

|                                   | Yüksek Dozlu Seri | Düşük Dozlu Seri |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| Numune Kodu                       | YD-Referans       | DD-Referans      |
| Çimento (kg/m <sup>3</sup> )      | 476               | 380              |
| S/Ç (%)                           | 0,578             | 0,722            |
| Standart Kum (kg/m <sup>3</sup> ) | 1428              | 1505             |
| Hava (%)                          | 3,4               | 3,6              |

#### 4.4.4. Taze Harç Deneyleri

##### 4.4.4.1. Öğütülmüş Doğal Zeolit Katkılı Çimento Hamurunda Kıvam Suyu ve Priz Tayini

Çalışmanın ileri deney programına dahil edilmek üzere seçilen üç ayrı ÖDZ numunesini çimento ile değişik oranlarda (harç bileşiminde tercih edilen ikame oranlarıyla) karıştırarak elde edilen çimento+doğal zeolit hamurunda kıvam suyu, priz başı ve priz sonu ölçümleri yapılmıştır. Yöntem olarak ‘‘TS EN 196-3: Mart 2002 Çimento Deney Metotları Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini’’ standardı referans alınmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 4.21’de verilmiştir (numune kodlaması DZ numarası ve çimentoya ağırlıkça ikame edilen ÖDZ miktarını ifade etmektedir).

**Tablo 4.21:** Öğütülmüş doğal zeolit katkılı çimento hamurunda kıvam suyu ve priz değerleri.

| Numune Kodu             | Kıvam Suyu (%) | Priz Başı (dk) | Priz Sonu (dk) |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Referans (%100 çimento) | 29,0           | 225            | 270            |
| DZ3-12                  | 35,0           | 230            | 320            |
| DZ3-18                  | 37,5           | 270            | 330            |
| DZ3-24                  | 39,5           | 280            | 380            |
| DZ3-36                  | 42,5           | 315            | 430            |
| DZ4-12                  | 34,5           | 200            | 270            |
| DZ4-18                  | 36,0           | 195            | 280            |
| DZ4-24                  | 37,0           | 205            | 295            |
| DZ4-36                  | 40,5           | 230            | 310            |
| DZ5-12                  | 32,0           | 240            | 330            |
| DZ5-18                  | 33,0           | 240            | 330            |
| DZ5-24                  | 33,5           | 230            | 320            |
| DZ5-36                  | 35,0           | 220            | 340            |

Deneyde her numune için 500g çimento (veya çimento+ÖDZ karışımı) kullanılmış ve Tablo 4.19'daki bileşimlere sadık kalınmıştır.

#### 4.4.4.2. Yayılma

“TS EN 196-1:2002 Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım” standardında tanımlı yöntemle hazırlanmış YD ve DD serisi harçların tamamı “ASTM C 230-08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement” standardında tarif edildiği şekilde yayılma deneyine tabi tutulmuştur. Yayılma ölçümlerinin sonucu Tablo 4.22’de verilmiştir.

**Tablo 4.22:** Harçların yayılma değerleri (ASTM C 230-08’e göre).

| Yüksek Dozlu Harç Serisi |             |                 |                  |              | Düşük Dozlu Harç Serisi |                 |                  |              |
|--------------------------|-------------|-----------------|------------------|--------------|-------------------------|-----------------|------------------|--------------|
| Zeolit Kodu              | Karışım No  | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Yayılma (cm) | Karışım No              | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Yayılma (cm) |
| -                        | YD-Referans | 100             | -                | 22,2         | DD-Referans             | 100             | -                | 21,2         |
| DZ 3                     | YD-DZ3-12   | 88              | 12               | 17,3         | DD-DZ3-12               | 88              | 12               | 17,7         |
|                          | YD-DZ3-18   | 88              | 18               | 14,8         | -                       | -               | -                | -            |
|                          | YD-DZ3-24   | 88              | 24               | 12,1         | DD-DZ3-24               | 88              | 24               | 14,9         |
|                          | YD-DZ3-36   | 88              | 36               | 11,0         | DD-DZ3-36               | 88              | 36               | 12,0         |
|                          | YD-DZ4-12   | 88              | 12               | 17,2         | DD-DZ4-12               | 88              | 12               | 17,5         |
| DZ 4                     | YD-DZ4-18   | 88              | 18               | 15,4         | -                       | -               | -                | -            |
|                          | YD-DZ4-24   | 88              | 24               | 12,9         | DD-DZ4-24               | 88              | 24               | 15,2         |
|                          | YD-DZ4-36   | 88              | 36               | 10,0         | DD-DZ4-36               | 88              | 36               | 12,1         |
|                          | YD-DZ5-12   | 88              | 12               | 19,9         | DD-DZ5-12               | 88              | 12               | 19,7         |
| DZ 5                     | YD-DZ5-18   | 88              | 18               | 19,2         | -                       | -               | -                | -            |
|                          | YD-DZ5-24   | 88              | 24               | 17,4         | DD-DZ5-24               | 88              | 24               | 18,4         |
|                          | YD-DZ5-36   | 88              | 36               | 14,8         | DD-DZ5-36               | 88              | 36               | 16,8         |

#### 4.4.4.3. Taze Harcın Birim Hacim Ağırlığı

“TS EN 196-1:2002 Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım” standardındaki tarife göre hazırlanmış YD ve DD serisi harçlarda “TS EN 12350-6: Nisan 2002 Beton - Taze Beton Deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk” standardına uygun olarak taze birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 4.23’te özet halinde sunulmuştur.

**Tablo 4.23:** Harçların taze birim hacim ağırlığı (TS EN 12350-6'ya göre).

| Yüksek Dozlu Harç Serisi |             |                 |                  |                                               | Düşük Dozlu Harç Serisi |                 |                  |                                               |
|--------------------------|-------------|-----------------|------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------------------|
| Zeolit Kodu              | Karışım No  | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Taze Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | Karışım No              | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Taze Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) |
| -                        | YD-Referans | 100             | -                | 2213                                          | DD-Referans             | 100             | -                | 2160                                          |
| <b>DZ 3</b>              | YD-DZ3-12   | 88              | 12               | 2151                                          | DD-DZ3-12               | 88              | 12               | 2141                                          |
|                          | YD-DZ3-18   | 88              | 18               | 2151                                          | -                       | -               | -                | -                                             |
|                          | YD-DZ3-24   | 88              | 24               | 2102                                          | DD-DZ3-24               | 88              | 24               | 2133                                          |
|                          | YD-DZ3-36   | 88              | 36               | 1809                                          | DD-DZ3-36               | 88              | 36               | 2046                                          |
|                          | YD-DZ4-12   | 88              | 12               | 2177                                          | DD-DZ4-12               | 88              | 12               | 2148                                          |
| <b>DZ 4</b>              | YD-DZ4-18   | 88              | 18               | 2157                                          | -                       | -               | -                | -                                             |
|                          | YD-DZ4-24   | 88              | 24               | 2143                                          | DD-DZ4-24               | 88              | 24               | 2135                                          |
|                          | YD-DZ4-36   | 88              | 36               | 1930                                          | DD-DZ4-36               | 88              | 36               | 2098                                          |
|                          | YD-DZ5-12   | 88              | 12               | 2187                                          | DD-DZ5-12               | 88              | 12               | 2159                                          |
| <b>DZ 5</b>              | YD-DZ5-18   | 88              | 18               | 2166                                          | -                       | -               | -                | -                                             |
|                          | YD-DZ5-24   | 88              | 24               | 2168                                          | DD-DZ5-24               | 88              | 24               | 2140                                          |
|                          | YD-DZ5-36   | 88              | 36               | 2159                                          | DD-DZ5-36               | 88              | 36               | 2136                                          |
|                          |             |                 |                  |                                               |                         |                 |                  |                                               |

**4.4.4.4. Hava İçeriği Tayini**

YD ve DD serisi harçlarda “TS EN 12350-7:2002 Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini - Basınç Metotları” standardına uygun olarak basınç yöntemi ile hava miktarı ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 4.24’te özet halinde sunulmuştur.

**Tablo 4.24:** Harçların hava içeriği (TS EN 12350-7: 2002'ye göre).

| Yüksek Dozlu Harç Serisi |             |                 |                  |          | Düşük Dozlu Harç Serisi |                 |                  |          |
|--------------------------|-------------|-----------------|------------------|----------|-------------------------|-----------------|------------------|----------|
| Zeolit Kodu              | Karışım No  | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Hava (%) | Karışım No              | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Hava (%) |
| -                        | YD-Referans | 100             | -                | 3,4      | DD-Referans             | 100             | -                | 3,6      |
| <b>DZ 3</b>              | YD-DZ3-12   | 88              | 12               | 3,8      | DD-DZ3-12               | 88              | 12               | 4,0      |
|                          | YD-DZ3-18   | 88              | 18               | 4,1      | -                       | -               | -                | -        |
|                          | YD-DZ3-24   | 88              | 24               | 4,4      | DD-DZ3-24               | 88              | 24               | 4,0      |
|                          | YD-DZ3-36   | 88              | 36               | 14,5     | DD-DZ3-36               | 88              | 36               | 5,2      |
|                          | YD-DZ4-12   | 88              | 12               | 3,5      | DD-DZ4-12               | 88              | 12               | 4,2      |
| <b>DZ 4</b>              | YD-DZ4-18   | 88              | 18               | 4,0      | -                       | -               | -                | -        |
|                          | YD-DZ4-24   | 88              | 24               | 3,8      | DD-DZ4-24               | 88              | 24               | 4,0      |
|                          | YD-DZ4-36   | 88              | 36               | 11,0     | DD-DZ4-36               | 88              | 36               | 4,0      |
|                          | YD-DZ5-12   | 88              | 12               | 3,2      | DD-DZ5-12               | 88              | 12               | 3,6      |
| <b>DZ 5</b>              | YD-DZ5-18   | 88              | 18               | 3,0      | -                       | -               | -                | -        |
|                          | YD-DZ5-24   | 88              | 24               | 3,5      | DD-DZ5-24               | 88              | 24               | 3,8      |
|                          | YD-DZ5-36   | 88              | 36               | 3,8      | DD-DZ5-36               | 88              | 36               | 3,8      |

#### 4.4.5. Sertleşmiş Harç Deneyleri

##### 4.4.5.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı Tayini

Harç numunelerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyi ‘‘TS EN 196-1:2002 Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım’’ standardında tarif edildiği şekilde yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.25 ve Tablo 4.26’da verilmiştir.

**Tablo 4.25:** Yüksek dozlu harçların eğilme ve basınç dayanımı (TS EN 196-1'e göre).

| Doğal Zeolit Kodu | Karışım No | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Eğilme Dayanımı (MPa) |      |       |       | Basınç Dayanımı (MPa) |      |       |       |
|-------------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|------|-------|-------|-----------------------|------|-------|-------|
|                   |            |                 |                  | 2gün                  | 7gün | 28gün | 56gün | 2gün                  | 7gün | 28gün | 56gün |
| -                 | YD-R       | 100             | -                | 4,9                   | 6,2  | 7,8   | 8,1   | 27,7                  | 39,7 | 50,9  | 56,0  |
| DZ 3              | YD-DZ3-12  | 88              | 12               | 4,0                   | 5,4  | 7,4   | 8,0   | 21,9                  | 33,4 | 51,2  | 57,5  |
|                   | YD-DZ3-18  | 88              | 18               | 4,3                   | 5,6  | 7,7   | 8,1   | 23,2                  | 34,8 | 52,7  | 57,5  |
|                   | YD-DZ3-24  | 88              | 24               | 3,9                   | 5,9  | 7,7   | 7,6   | 22,8                  | 35,6 | 57,2  | 60,7  |
|                   | YD-DZ3-36  | 88              | 36               | 2,7                   | 4,4  | 6,4   | 6,7   | 16,8                  | 29,2 | 48,5  | 56,7  |
| DZ 4              | YD-DZ4-12  | 88              | 12               | 4,4                   | 5,6  | 7,5   | 8,0   | 23,4                  | 34,9 | 50,5  | 56,0  |
|                   | YD-DZ4-18  | 88              | 18               | 4,3                   | 5,6  | 6,9   | 7,5   | 24,5                  | 36,5 | 53,0  | 57,0  |
|                   | YD-DZ4-24  | 88              | 24               | 4,0                   | 5,5  | 7,4   | 7,9   | 25,0                  | 37,1 | 57,8  | 61,0  |
|                   | YD-DZ4-36  | 88              | 36               | 3,4                   | 4,6  | 6,9   | 7,0   | 24,7                  | 35,6 | 53,4  | 61,0  |
| DZ 5              | YD-DZ5-12  | 88              | 12               | 4,5                   | 5,9  | 7,7   | 8,2   | 22,0                  | 33,3 | 50,7  | 57,2  |
|                   | YD-DZ5-18  | 88              | 18               | 4,3                   | 6,1  | 7,7   | 8,3   | 22,0                  | 33,2 | 53,2  | 59,4  |
|                   | YD-DZ5-24  | 88              | 24               | 4,7                   | 6,0  | 8,0   | 8,4   | 23,3                  | 36,5 | 58,3  | 60,5  |
|                   | YD-DZ5-36  | 88              | 36               | 4,5                   | 6,4  | 8,7   | 8,4   | 25,4                  | 39,0 | 61,9  | 65,9  |

**Tablo 4.26:** Düşük dozlu harçların eğilme ve basınç dayanımı (TS EN 196-1'e göre).

| Doğal Zeolit Kodu | Karışım No | CEM I 42.5R (%) | Doğal Zeolit (%) | Eğilme Dayanımı (MPa) |      |       |       | Basınç Dayanımı (MPa) |      |       |       |
|-------------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|------|-------|-------|-----------------------|------|-------|-------|
|                   |            |                 |                  | 2gün                  | 7gün | 28gün | 56gün | 2gün                  | 7gün | 28gün | 56gün |
| -                 | DD-R       | 100             | -                | 4,1                   | 4,9  | 6,5   | 6,8   | 18,5                  | 26,9 | 36,5  | 39,0  |
| DZ 3              | DD-DZ3-12  | 88              | 12               | 2,1                   | 4,2  | 6,5   | 7,1   | 13,4                  | 21,4 | 37,0  | 39,6  |
|                   | DD-DZ3-24  | 88              | 24               | 2,4                   | 4,0  | 6,5   | 7,2   | 13,2                  | 21,7 | 38,8  | 42,8  |
|                   | DD-DZ3-36  | 88              | 36               | 2,6                   | 3,8  | 6,3   | 6,8   | 13,7                  | 22,7 | 42,5  | 46,6  |
| DZ 4              | DD-DZ4-12  | 88              | 12               | 2,5                   | 4,2  | 5,9   | 6,8   | 14,9                  | 22,6 | 35,0  | 39,1  |
|                   | DD-DZ4-24  | 88              | 24               | 3,1                   | 4,1  | 6,5   | 6,9   | 14,6                  | 22,9 | 40,1  | 43,0  |
|                   | DD-DZ4-36  | 88              | 36               | 3,0                   | 3,7  | 6,2   | 6,4   | 15,2                  | 24,2 | 42,6  | 45,8  |
| DZ 5              | DD-DZ5-12  | 88              | 12               | 3,2                   | 4,1  | 6,3   | 6,8   | 14,3                  | 22,5 | 36,5  | 41,3  |
|                   | DD-DZ5-24  | 88              | 24               | 3,0                   | 4,3  | 6,6   | 7,3   | 13,6                  | 22,4 | 38,7  | 44,6  |
|                   | DD-DZ5-36  | 88              | 36               | 3,1                   | 4,7  | 7,1   | 7,3   | 14,8                  | 24,4 | 43,7  | 48,1  |

#### 4.4.6. Durabilite Deneyleri

##### 4.4.6.1. Alkali-Silis Reaksiyonu Deneyi

Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçlarda alkali-silis reaksiyonu gelişme riskinin ölçülmesinde “ASTM C1567-08 Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)” standardı referans alınmıştır. Ancak standardın tarif ettiği şekilde, ağırlıkça 1 birim çimento+ÖDZ karışımına karşılık 2.25 birim granülometrik dağılımı önceden ayarlanmış kum katılması durumunda, doğal zeolit çimentonunkinden düşük olan özgül ağırlığı nedeniyle karışımın toplam hacminde bir artış meydana gelmektedir.

Bu nedenle, ÖDZ numunelerinin her biri ile, ikame oranının %12 olduğu karışımlar hacim artışı dikkate alınmadan (standardın tarif ettiği gibi) yapıldıktan sonra (Tablo 4.27 ve Tablo 4.28’de DZ3-12a, DZ4-12a ve DZ5-12a kodlu harçlar) takip eden diğer 3 karışım çimento+öğütülmüş doğal zeolit toplamının hacmi referans bileşimle aynı tutularak üretilmiştir. Bu karışımlarda ÖDZ, referans formüldeki çimento miktarına yaklaşık %11, %20 ve %26 mertebelerinde ikame edilmiştir. Dolayısıyla, ÖDZ katkısı oranı çalışma bütünlüğünü korumak bakımından numune kodlarında 12, 24 ve 36 rakamlarıyla ifade edilmekle birlikte, gerçek ikame oranları yukarıda belirtildiği gibidir. Her harç bileşimi için iki prizma hazırlanmıştır.

Deneyde kullanılan CEM I çimentosunun  $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğer ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ ) alkali miktarı %0,57’dir. CEM I+ÖDZ katkılı karışımlarda ise bu oran doğal zeolit kaynağına ve karışımdaki miktarına bağlı olarak % 0,72-1,27 aralığında yer almıştır (Tablo 4.27). Tablo 4.6’daki veriler incelendiğinde, DZ9 kodlu numune hariç tüm doğal zeolitlerin potasyumca zengin karakterde olduğu görülmektedir.

Deneyde kullanılan harç prizmalarının bileşimi Tablo 4.27’de verilmiştir. Deney sonuçları ise ortalama değerler halinde, özet olarak Tablo 4.28’de sunulmuştur.

**Tablo 4.27:** Alkali-silis reaksiyonu potansiyelinin ölçümünde kullanılan harç bileşimi (ASTM C 1567-08'e uygun).

| Karışım No | Çimento (g) | ÖDZ (g) | ÖDZ (%) | Çimento + ÖDZ (g) | Çimento + ÖDZ (cm <sup>3</sup> ) | Kum (g) | S/Ç+ÖDZ (%) | Çimento+ÖDZ Na <sub>2</sub> O Eşd. Alkali (%) | Açıklama                                             |
|------------|-------------|---------|---------|-------------------|----------------------------------|---------|-------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Referans   | 440         | -       | -       | 440,0             | 140,6                            | 990     | 0,47        | 0,57                                          | Standart yöntemdeki bileşim                          |
| DZ3-12a    | 387,2       | 52,8    | 12,0    | 440,0             | 148,5                            | 990     | 0,47        | 0,72                                          | Referansın %12'si kadar DZ3 (karışım hacminde artış) |
| DZ3-12     | 366         | 50      | 11,4    | 416,0             | 140,4                            |         |             | 0,72                                          | Çimento + ÖDZ hacmi referans bileşimle aynı          |
| DZ3-24     | 314         | 85,6    | 19,5    | 399,6             | 140,5                            |         |             | 0,83                                          |                                                      |
| DZ3-36     | 275         | 112,5   | 25,6    | 387,5             | 140,7                            |         |             | 0,93                                          |                                                      |
| DZ4-12a    | 387,2       | 52,8    | 12,0    | 440,0             | 147,0                            | 990     | 0,47        | 0,86                                          | Referansın %12'si kadar DZ4 (karışım hacminde artış) |
| DZ4-12     | 370,2       | 50,6    | 11,5    | 420,8             | 140,6                            |         |             | 0,86                                          | Çimento + ÖDZ hacmi referans bileşimle aynı          |
| DZ4-24     | 319,9       | 87,2    | 19,8    | 407,1             | 140,6                            |         |             | 1,09                                          |                                                      |
| DZ4-36     | 281,4       | 115,1   | 26,2    | 396,5             | 140,6                            |         |             | 1,27                                          |                                                      |
| DZ5-12a    | 387,2       | 52,8    | 12      | 440,0             | 147,6                            | 990     | 0,47        | 0,75                                          | Referansın %12'si kadar DZ5 (karışım hacminde artış) |
| DZ5-12     | 368,6       | 50,4    | 11,5    | 419,0             | 140,6                            |         |             | 0,75                                          | Çimento + ÖDZ hacmi referans bileşimle aynı          |
| DZ5-24     | 317,4       | 86,5    | 19,7    | 403,9             | 140,5                            |         |             | 0,90                                          |                                                      |
| DZ5-36     | 278,6       | 114,0   | 25,9    | 392,6             | 140,6                            |         |             | 1,01                                          |                                                      |

**Tablo 4.28:** Harçların alkali-silis reaksiyonu potansiyeli.

| Karışım<br>No | Genleşme (%) |      |       |
|---------------|--------------|------|-------|
|               | 3gün         | 7gün | 14gün |
| Referans      | 0,01         | 0,08 | 0,14  |
| DZ3-12a       | 0,02         | 0,03 | 0,07  |
| DZ3-12        | 0,01         | 0,03 | 0,05  |
| DZ3-24        | 0,02         | 0,04 | 0,04  |
| DZ3-36        | 0,03         | 0,03 | 0,03  |
| DZ4-12a       | 0,01         | 0,03 | 0,06  |
| DZ4-12        | 0,02         | 0,03 | 0,04  |
| DZ4-24        | 0,00         | 0,01 | 0,02  |
| DZ4-36        | 0,02         | 0,03 | 0,03  |
| DZ5-12a       | 0,00         | 0,01 | 0,04  |
| DZ5-12        | 0,00         | 0,01 | 0,03  |
| DZ5-24        | -0,01        | 0,00 | -0,01 |
| DZ5-36        | -0,01        | 0,00 | 0,00  |

#### 4.4.6.2. Sülfat Etkisi Deneyi

Sülfat çözeltisi içinde saklanmış harç prizmalarında uzama ölçümü için ‘‘ASTM C 1012–09 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution’’ standardı referans alınmıştır. Sülfat hasarını daha açık bir şekilde gözlemleyebilmek için, standardın tarif ettiği gibi ağırlıkça bir birim çimentoya karşılık 2,75 birim standart kum ve standartta önerilen S/Ç oranı yerine, bu deneyde Tablo 4.19’da verilen DD harç serisinin %12 ve %24 ÖDZ katkılı bileşimleri tercih edilmiştir. Tablo 4.19’daki DD serisi harç bileşimi dikkate alındığında kum/çimento oranı referans harç için 3,96’dır. Katkılı harçlarda ise, kum/çimento+ÖDZ oranı doğal zeolitin kaynağına ve karışımdaki miktarına bağlı olarak 3,36-3,92 aralığında yer almıştır. Standardın Portland-puzolan çimentoları için önerdiği 0,485 S/Ç oranı yerine; deneydeki referans, %12 ÖDZ katkılı ve %24 ÖDZ katkılı harçların S/Ç oranı sırasıyla 0,722; 0,722 ve 0,645’tir. Dolayısıyla deneyde tercih edilen harç bileşimi, standartta tarif edilenden daha düşük dozlu ve daha dayanıksızdır. Ayrıca, sülfat etkisini hızlandırmak amacıyla, deney solüsyonu 1 litre suda 100g  $MgSO_4$  çözerek hazırlanmıştır (standardın tarifi 1 litre suda çözünmüş 50g  $Na_2SO_4$ ). Deney süresi boyunca  $MgSO_4$  çözeltisi sekiz kere yenilenmiştir. Ölçümler her harç bileşimi

için iki prizma üzerinde yapılmıştır. Prizmalardaki genleşmeye ait ölçüm değerleri ortalama halinde Tablo 4.29’da verilmiştir.

**Tablo 4.29:** Harç prizmalarında sülfat etkisiyle genleşme.

| Numune No          | Numune Yaşı ve Genleşme (%) |       |       |       |       |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 14gün                       | 42gün | 56gün | 73gün | 87gün | 108gün | 139gün | 167gün | 202gün | 229gün | 259gün |
| <b>DD-Referans</b> | 0,01                        | 0,02  | 0,02  | 0,03  | 0,05  | 0,09   | 0,10   | 0,13   | 0,16   | 0,19   | 0,24   |
| <b>DD-DZ3-12</b>   | 0,01                        | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,06  | 0,08   | 0,10   | 0,13   | 0,15   | 0,17   | 0,20   |
| <b>DD-DZ3-24</b>   | 0,01                        | 0,01  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00   | 0,02   | 0,02   | 0,03   | 0,05   |
| <b>DD-DZ4-12</b>   | 0,01                        | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0,05  | 0,07   | 0,10   | 0,12   | 0,15   | 0,18   | 0,24   |
| <b>DD-DZ4-24</b>   | 0,00                        | 0,01  | 0,00  | 0,00  | 0,01  | 0,02   | 0,03   | 0,05   | 0,07   | 0,09   | 0,13   |
| <b>DD-DZ5-12</b>   | 0,00                        | 0,02  | 0,02  | 0,04  | 0,05  | 0,08   | 0,11   | 0,15   | 0,20   | 0,24   | 0,32   |
| <b>DD-DZ5-24</b>   | 0,00                        | 0,01  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,01   | 0,02   | 0,03   | 0,05   | 0,08   |

#### 4.4.6.3. Klor İyonu Penetrasyonu Deneyi

Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların klor iyonu penetrasyonuna direncinin ölçülmesinde ‘‘ASTM C1202-10 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration’’ standardı temel alınmıştır. Bu deneyde kullanılacak harç numuneleri, Tablo 4.19’da tanımlanmış düşük dozlu harç serisinin bileşimine göre, %12 ve %24 ÖDZ katkılı olarak Ø100mm ve yüksekliği 200mm silindir kalıplar içerisinde hazırlanmıştır. Deneyde her bileşim için 2 adet silindir numunesi üretilmiştir. 28 gün su kürüne tabi tutulan silindir numunelerinin iki ucundan 2,0-2,5cm’lik birer dilim kesilerek atılmış ve deneyde kullanılmak üzere her silindir numunesinden yaklaşık 2 inç kalınlığında iki adet silindirik numune dilimi (‘‘alt’’ ve ‘‘üst’’ kodlarıyla tanımlı) kesilerek çıkartılmıştır. Klor iyonu penetrasyonu deney düzeneği Şekil 4.24’te görülmektedir. Deney sonuçları özet halinde Tablo 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.24: Klor iyonu penetrasyonu deney düzeneği.

**Tablo 4.30:** Ögütülmüş doğal zeolit katkılı harçların klor difüzyonu.

|                 | ÖDZ (%)   | Numune No | Silindir No | Kalınlık <sub>ort</sub> (mm) | Q     | Q <sub>ort-üst</sub> | Q <sub>ort-alt</sub> | Q <sub>ort-genel</sub> |
|-----------------|-----------|-----------|-------------|------------------------------|-------|----------------------|----------------------|------------------------|
| <b>Referans</b> | <b>-</b>  | <b>1</b>  | 1-3 Üst     | 52,0                         | 13473 | 14450                | 11957                | 13203                  |
|                 |           |           | 1-3 Alt     | 52,1                         | 11394 |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 1-4 Üst     | 52,1                         | 15426 |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 1-4 Alt     | 52,9                         | 12519 |                      |                      |                        |
| <b>DZ3-12</b>   | <b>12</b> | <b>2</b>  | 2-1 Üst     | 51,6                         | 2439  | 2480                 | 2133                 | 2306                   |
|                 |           |           | 2-1 Alt     | 51,3                         | 2133  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 2-2 Üst     | 51,5                         | 2520  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 2-2 Alt     | 51,6                         | 2133  |                      |                      |                        |
| <b>DZ3-24</b>   | <b>24</b> | <b>3</b>  | 3-1 Üst     | 51,1                         | 1233  | 1247                 | 1008                 | 1127                   |
|                 |           |           | 3-1 Alt     | 50,8                         | 1017  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 3-2 Üst     | 50,0                         | 1260  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 3-2 Alt     | 51,0                         | 999   |                      |                      |                        |
| <b>DZ4-12</b>   | <b>12</b> | <b>4</b>  | 4-1 Üst     | 50,7                         | 2925  | 2984                 | 2610                 | 2797                   |
|                 |           |           | 4-1 Alt     | 51,0                         | 2655  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 4-2 Üst     | 50,9                         | 3042  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 4-2 Alt     | 51,5                         | 2565  |                      |                      |                        |
| <b>DZ4-24</b>   | <b>24</b> | <b>5</b>  | 5-1 Üst     | 51,0                         | 1566  | 1544                 | 1287                 | 1415                   |
|                 |           |           | 5-1 Alt     | 51,8                         | 1305  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 5-2 Üst     | 51,5                         | 1521  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 5-2 Alt     | 51,7                         | 1269  |                      |                      |                        |
| <b>DZ5-12</b>   | <b>12</b> | <b>6</b>  | 6-1 Üst     | 51,2                         | 2673  | 2579                 | 2291                 | 2435                   |
|                 |           |           | 6-1 Alt     | 50,7                         | 2403  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 6-2 Üst     | 50,6                         | 2484  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 6-2 Alt     | 52,9                         | 2178  |                      |                      |                        |
| <b>DZ5-24</b>   | <b>24</b> | <b>7</b>  | 7-1 Üst     | 52,2                         | 1152  | 1125                 | 936                  | 1031                   |
|                 |           |           | 7-1 Alt     | 52,5                         | 936   |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 7-2 Üst     | 52,5                         | 1098  |                      |                      |                        |
|                 |           |           | 7-2 Alt     | 52,5                         | 936   |                      |                      |                        |

Q: Coulomb

**4.4.6.4. Kılcal ve Serbest Su Emme Deneyi**

Referans ve ÖDZ katkılı harç numunelerinin kılcal ve serbest su emme miktarlarının ölçümü “TS EN 196-1:2002 Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım”

standardına uygun olarak hazırlanmış harç prizmaları ile yapılmıştır. Her harç bileşimi için iki adet prizma kullanılmıştır.

Kılcal su emme numunelerinin hazırlanması ve kürlenmesinde ‘‘BS EN 480-5:2005 Admixtures for concrete, mortar and grout — Test methods — Part 5: Determination of capillary absorption’’ standardında tanımlanan ilkelere başvurulmuş, hesaplama aşamasında ise Onaran (2006) tarafından önerilen yöntemden yararlanılmıştır.

Serbest su emme ölçümünde kullanılan numuneler  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 28 günlük su kürüne tabi tutulduktan sonra bir hafta laboratuvar ortamında saklanmıştır. Deneyden önce  $60^{\circ}\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulan numuneler tartılmış ve sonra tekrar  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta su kürüne tabi tutulmuştur.

Referans ve ÖDZ katkılı, yüksek dozlu ve düşük dozlu serilere ait harç prizmalarının kılcal ve serbest su emme değerleri Tablo 4.31’de verilmiştir.

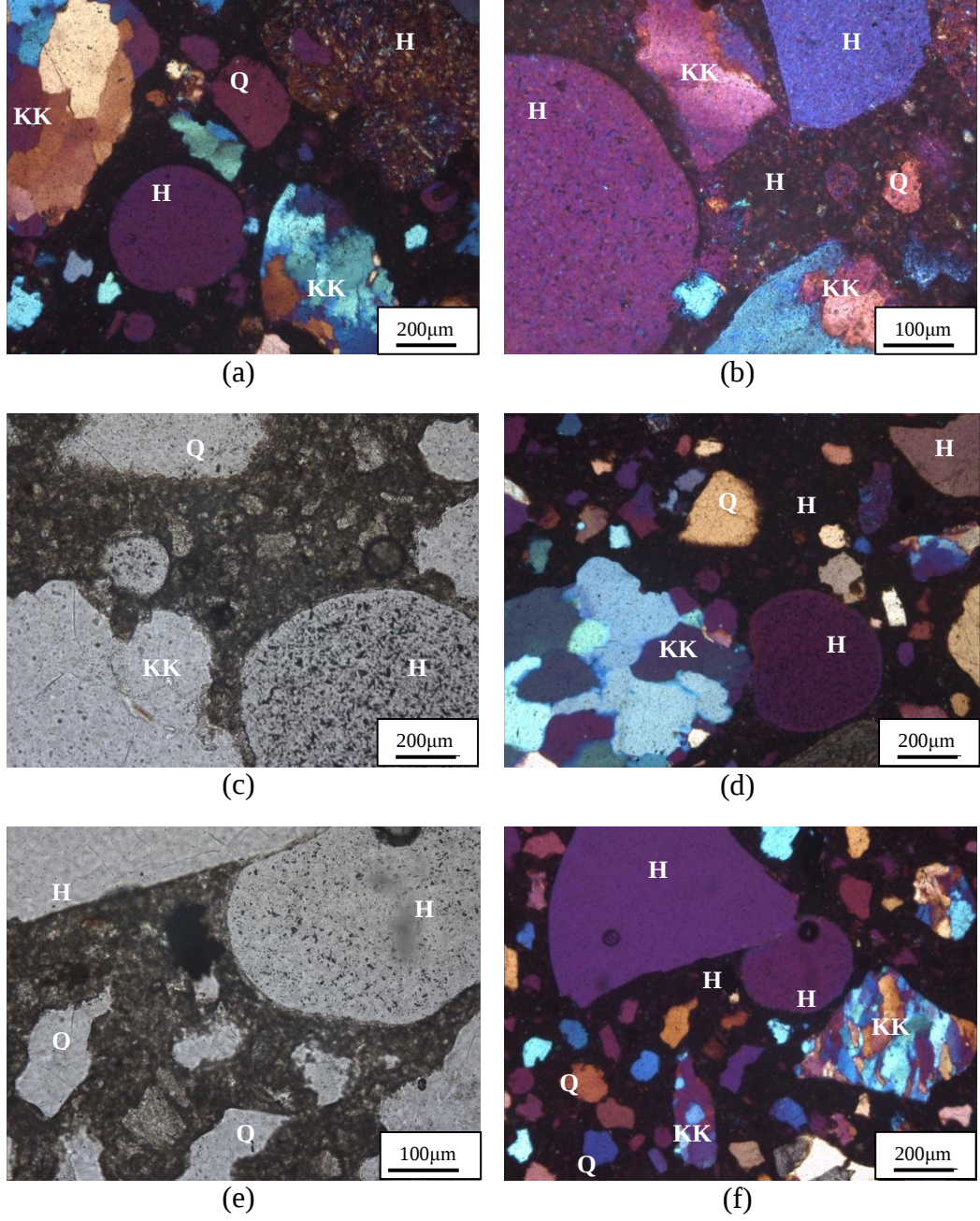
**Tablo 4.31:** Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların kılcal ve serbest su emme değerleri.

|                | Zeolit Kodu | CEM I (%) | Doğal Zeolit (%) | Numune No   | Kılcallık ( $\times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{g}$ ) | Serbest Su Emme (%) |
|----------------|-------------|-----------|------------------|-------------|------------------------------------------------------|---------------------|
| YD Harç Serisi | -           | 100       | -                | YD-Referans | 314,3                                                | 4,5                 |
|                | DZ 3        | 88        | 12               | YD-DZ3-12   | 168,1                                                | 3,7                 |
|                |             | 88        | 18               | YD-DZ3-18   | 122,6                                                | 3,2                 |
|                |             | 88        | 24               | YD-DZ3-24   | 111,8                                                | 3,4                 |
|                |             | 88        | 36               | YD-DZ3-36   | 158,9                                                | 4,3                 |
|                | DZ 4        | 88        | 12               | YD-DZ4-12   | 205,7                                                | 4,3                 |
|                |             | 88        | 18               | YD-DZ4-18   | 148,7                                                | 4,6                 |
|                |             | 88        | 24               | YD-DZ4-24   | 100,4                                                | 3,6                 |
|                |             | 88        | 36               | YD-DZ4-36   | 114,0                                                | 3,6                 |
|                | DZ 5        | 88        | 12               | YD-DZ5-12   | 222,5                                                | 4,7                 |
|                |             | 88        | 18               | YD-DZ5-18   | 177,2                                                | 3,9                 |
|                |             | 88        | 24               | YD-DZ5-24   | 149,1                                                | 3,4                 |
|                |             | 88        | 36               | YD-DZ5-36   | 112,9                                                | 3,4                 |
| DD Harç Serisi | -           | 100       | -                | YD-Referans | 752,7                                                | 6,4                 |
|                | DZ 3        | 88        | 12               | DD-DZ3-12   | 424,0                                                | 6,0                 |
|                |             | 88        | 24               | DD-DZ3-24   | 263,3                                                | 5,1                 |
|                |             | 88        | 36               | DD-DZ3-36   | 239,8                                                | 4,3                 |
|                | DZ 4        | 88        | 12               | DD-DZ4-12   | 407,4                                                | 5,8                 |
|                |             | 88        | 24               | DD-DZ4-24   | 280,2                                                | 5,2                 |
|                |             | 88        | 36               | DD-DZ4-36   | 188,2                                                | 4,8                 |
|                | DZ 5        | 88        | 12               | DD-DZ5-12   | 432,1                                                | 6,0                 |
|                |             | 88        | 24               | DD-DZ5-24   | 270,6                                                | 5,3                 |
|                |             | 88        | 36               | DD-DZ5-36   | 193,3                                                | 4,4                 |

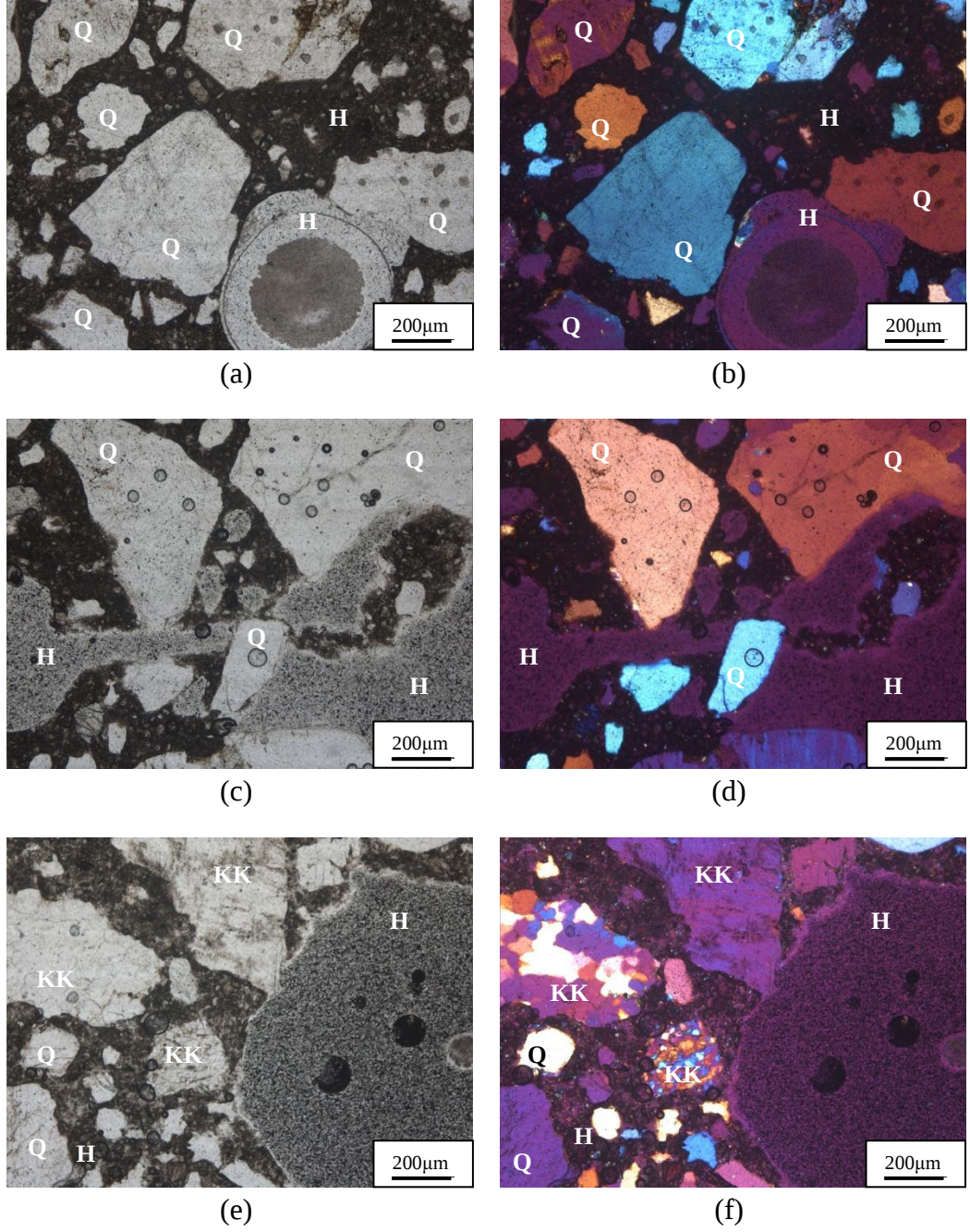
#### 4.4.7. Sertleşmiş Harç Numunelerinin Mikro Yapısı

##### 4.4.7.1. Harç Numunelerinin Polarizan Mikroskop İncelemesi

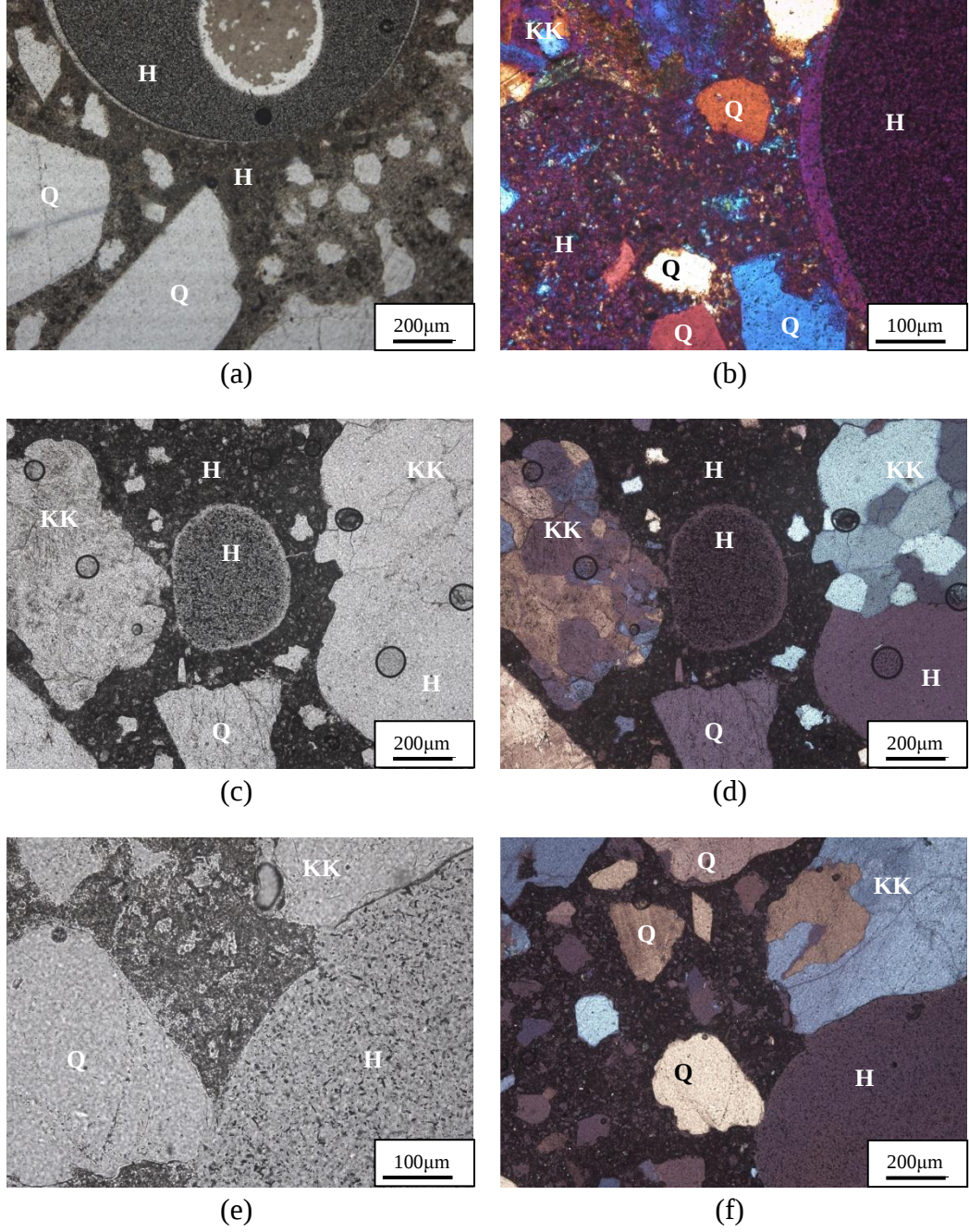
YD ve DD serisi harçlardan hazırlanmış ince kesit numuneleri üzerinde Leitz Ortoplan polarizan mikroskop ve Leica Application Suite görüntü analiz sistemi ile petrografik inceleme yapılmıştır. Bu numunelerde karışımında agrega olarak kullanılan kuvars kumu dışında bağlayıcı fazı oluşturan hidratasyon ürünleri net bir şekilde görülebilmektedir. Ancak, polarizan mikroskopla matriks fazındaki hidratasyon ürünlerinin tanımlanabilmesi mümkün değildir. İnce kesitte görülebilen tipik yapıya ait fotoğraflar Şekil 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’da verilmiştir.



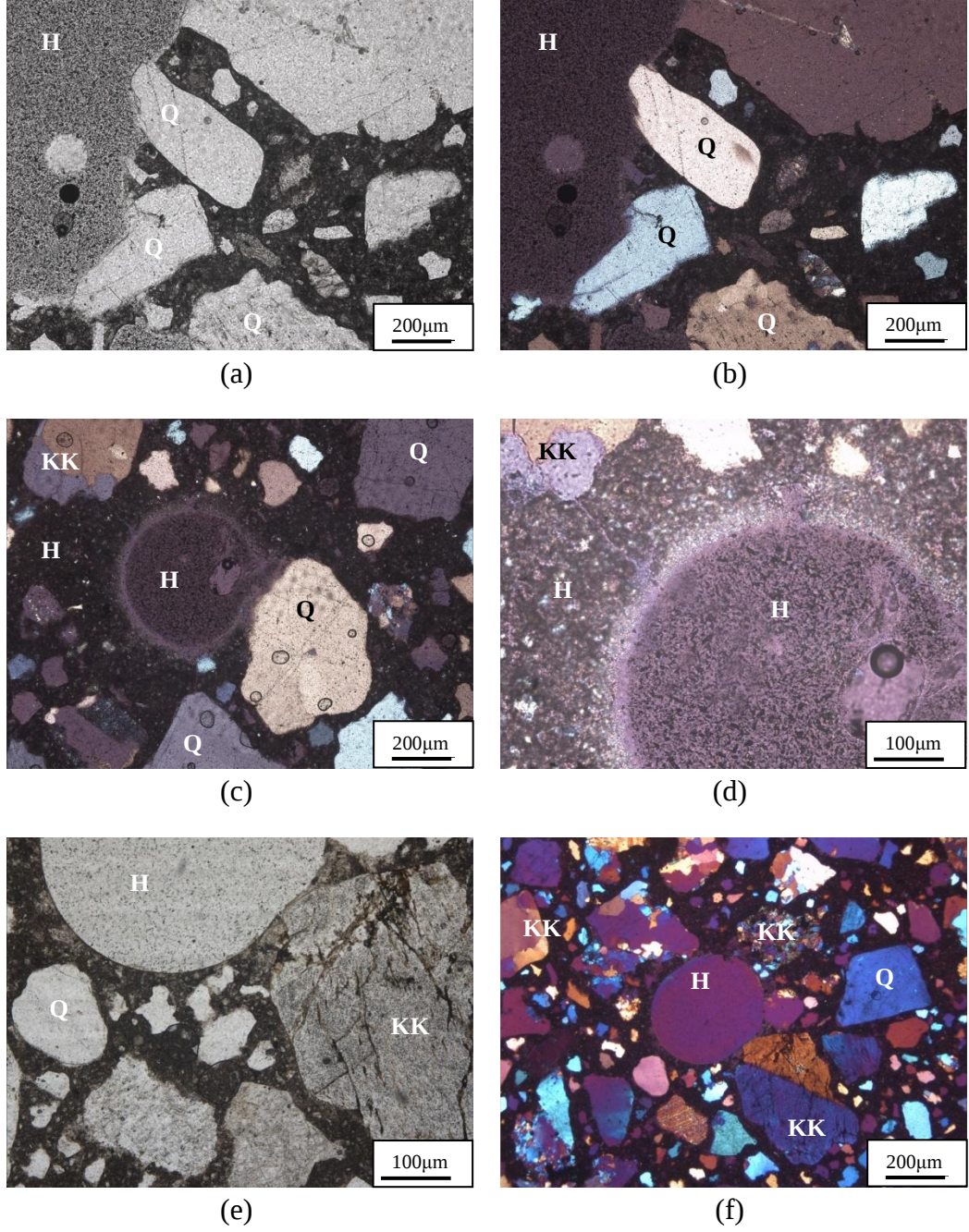
**Şekil 4.25:** ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri (KK: Kaya kırıntısı, Q: Kuvars, H: Hidratasyon ürünü) a) DD DZ3-12 jips kamalı, b) DD DZ3-12 jips kamalı, c) DD DZ3-24 tek nikol, d) DD DZ3-24 jips kamalı, e) DD DZ3-36 tek nikol, f) DD DZ3-36 jips kamalı



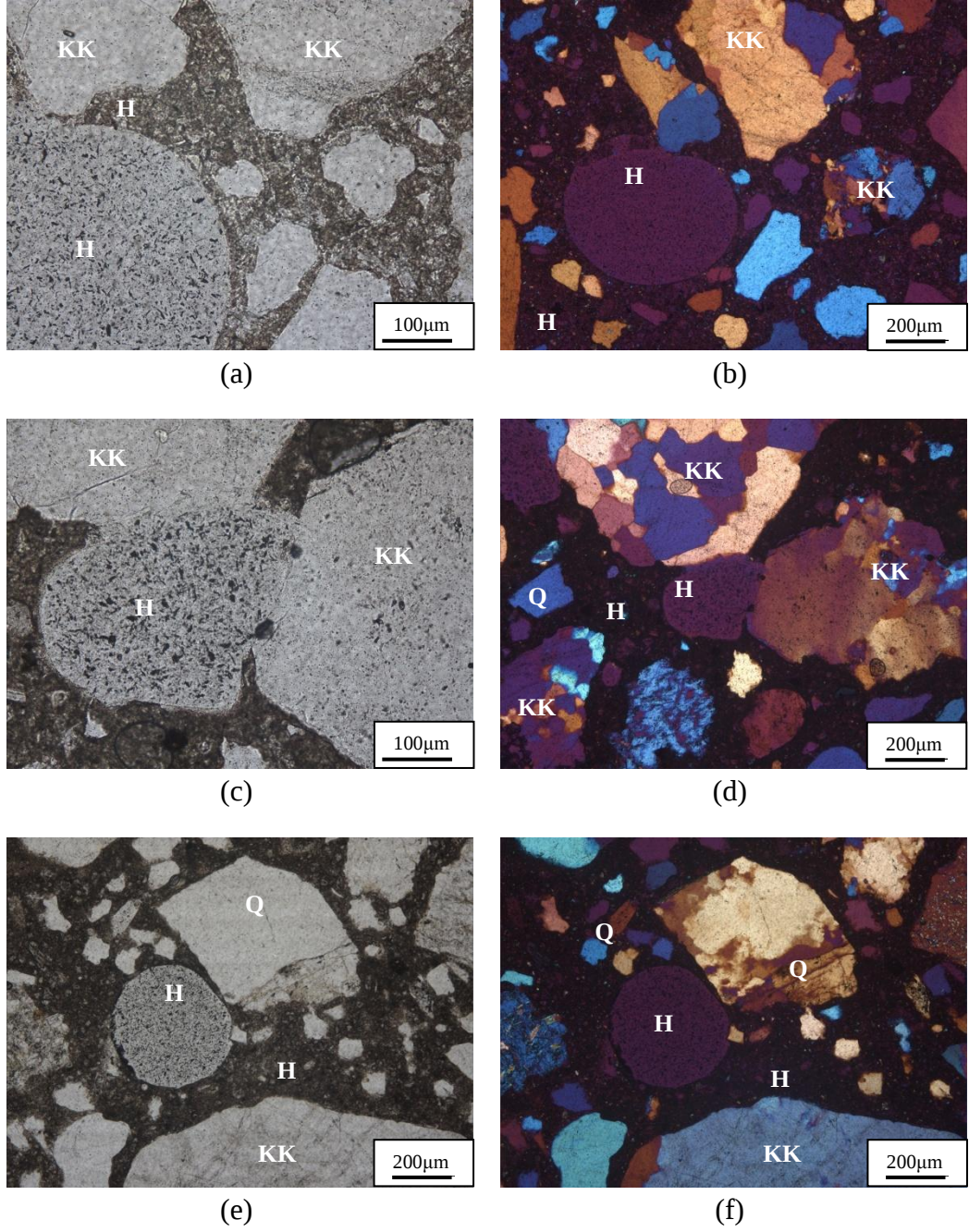
**Şekil 4.26:** ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri (KK: Kaya kırıntısı, Q: Kuvars, H: Hidratasyon ürünü). a) DD DZ4-24 tek nikol, b) DD DZ4-24 jips kamalı, c) DD DZ5-12 tek nikol, d) DD DZ5-12 jips kamalı, e) DD DZ5-24 tek nikol, f) DD DZ5-24 jips kamalı



**Şekil 4.27:** ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri (KK: Kaya kırıntısı, Q: Kuvars, H: Hidratasyon ürünü). a) YD Ref. tek nikol, b) YD Ref. jips kamalı, c) YD DZ3-18 tek nikol, d) YD DZ3-18 jips kamalı, e) YD DZ3-24 tek nikol, f) YD DZ3-24 jips kamalı



**Şekil 4.28:** ÖDZ katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri (KK: Kaya kırıntısı, Q: Kuvars, H: Hidratasyon ürünü). a) YD DZ3-36 tek nikol, b) YD DZ3-36 jips kamalı, c) YD DZ4-12 jips kamalı, d) YD DZ4-12 jips kamalı, e) YD DZ4-18 tek nikol, f) YD DZ4-18 jips kamalı



**Şekil 4.29:** ÖZD katkılı harçların polarizan mikroskop görüntüleri (KK: Kaya kırıntısı, Q: Kuvars, H: Hidratasyon ürünü). a) YD DZ4-24 tek nikol, b) YD DZ4-24 jips kamalı, c) YD DZ4-36 tek nikol, d) YD DZ4-36 jips kamalı, e) YD DZ5-12 tek nikol, f) YD DZ5-12 jips kamalı

#### 4.4.7.2. Harç Numunelerinin Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

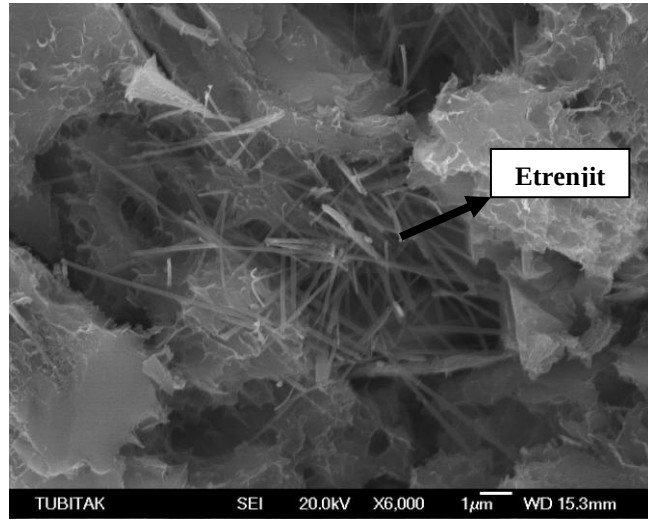
Puzolanik çimentoların hidratasyonu ile ortaya çıkan bileşenler Portland çimentosununkinden farklı değildir. Farklılık bileşenlerin oranları ve morfolojisinde görülür. Sertleşmiş hamurda bulunan ana hidrate elemanlar şunlardır:

- Etrenjit (doğal puzolan içeren çimentolarda çok hızlı gelişir)
- Tetrakalsiyum alüminat hidrat (çoğunlukla karbonatlaşmış halde)
- Monosülfoalüminat
- C-S-H
- $C_2ASH_8$
- $Ca(OH)_2$
- $CaCO_3$

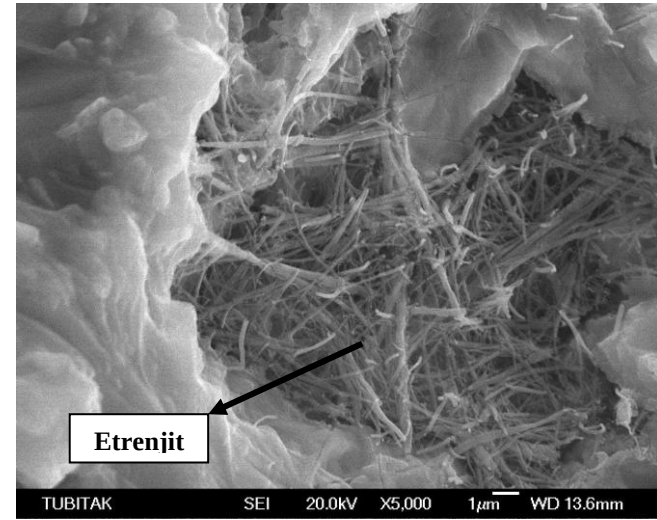
Çimento hamurunun mikro yapısının değişimi gibi hidratasyon ürünlerinin oluşumu da Portland çimentosu ve puzolanın özellikleri, incelikleri, S/Ç oranı ve sıcaklık gibi bir çok etkene bağlıdır. Bu nedenle, klinkerin hidratasyonu ve puzolanın reaksiyonu süreçlerini tam olarak tarif edebilmek mümkün değildir (Hewlett, 2008).

Agrega tanelerinin varlığı dışında, puzolan katkılı harçların mikroyapısı puzolan katkılı hamurlarından çok az farklılık gösterir. SEM incelemeleri, kalsiyum hidroksitin puzolan tarafından tüketilmesi ile portlandit kristallerinin hem agrega-hamur arayüzünde hem de hamur içerisinde miktar ve boy bakımından azaldığını göstermektedir. Serbest kireç miktarındaki azalma, beraberinde harçtaki kusurlarda azalmaya neden olur ve matriksin homojenitesini artırır (Hewlett, 2008).

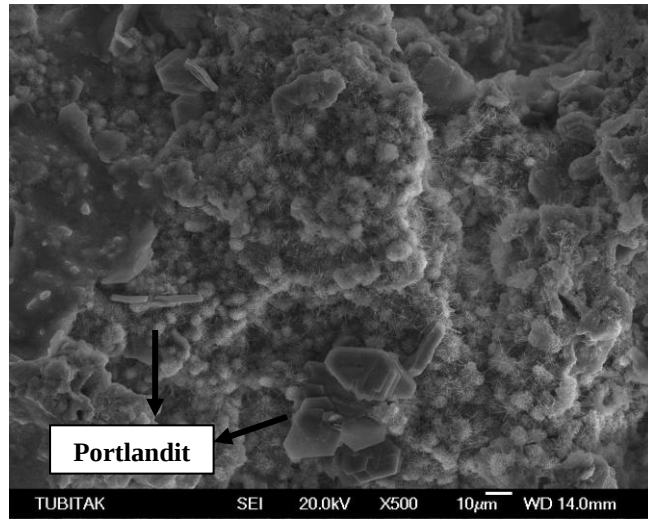
Öğütülmüş doğal zeolit katkılı ve referans harçların taramalı elektron mikroskobu incelemesi sırasında iç yapıda tespit edilmiş portlandit, etrenjit, kalsit ve hidrate ürün gibi farklı oluşumlar Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir.



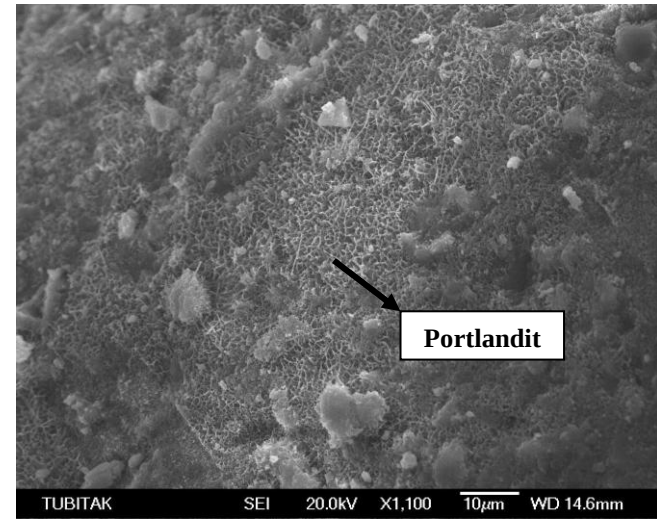
(a)



(b)

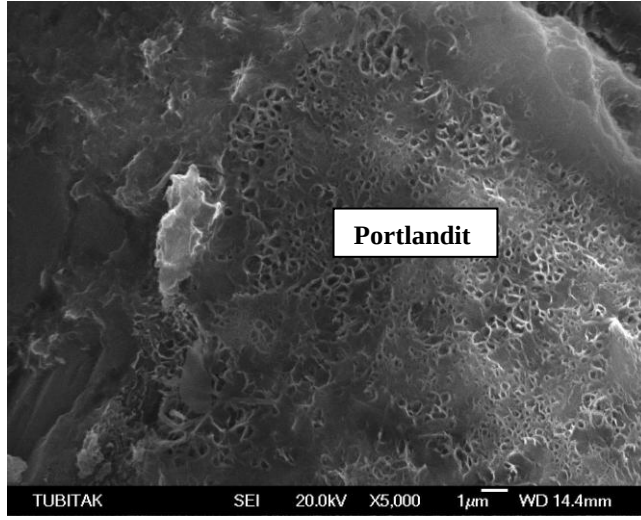


(c)

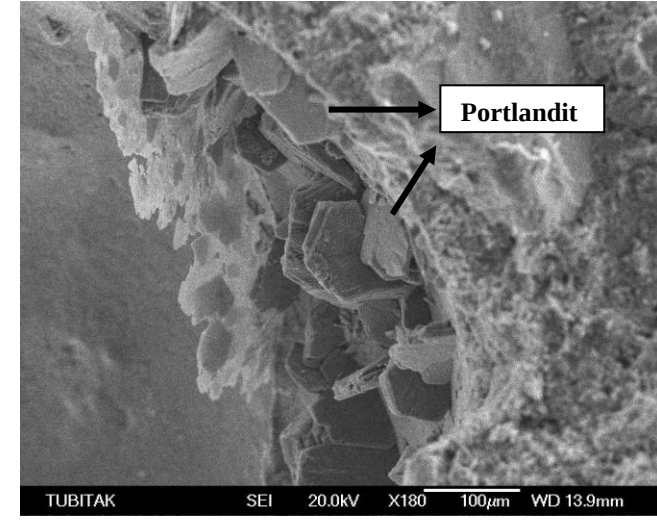


(d)

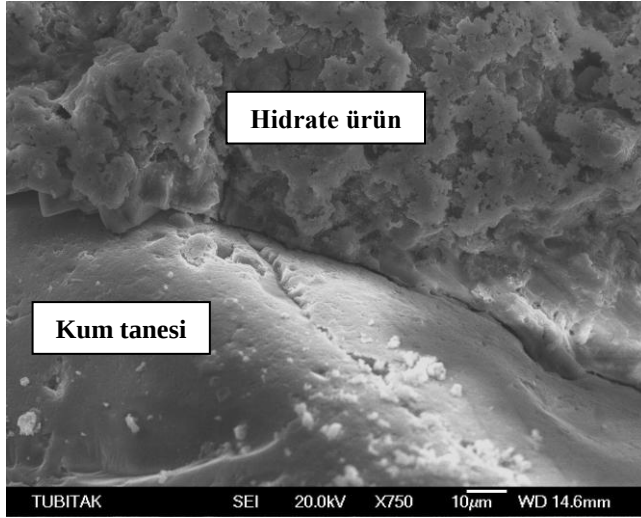
Şekil 4.30: ÖDZ katkılı harçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. a) ve b) YD DZ3-12, c) ve d) YD DZ5-12.



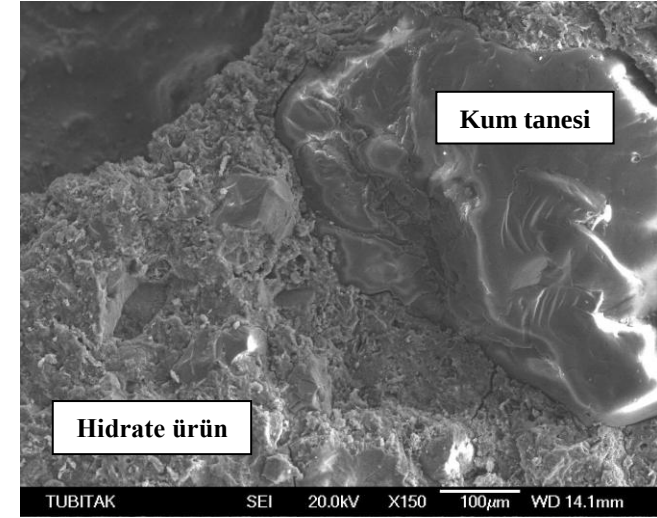
(a)



(b)

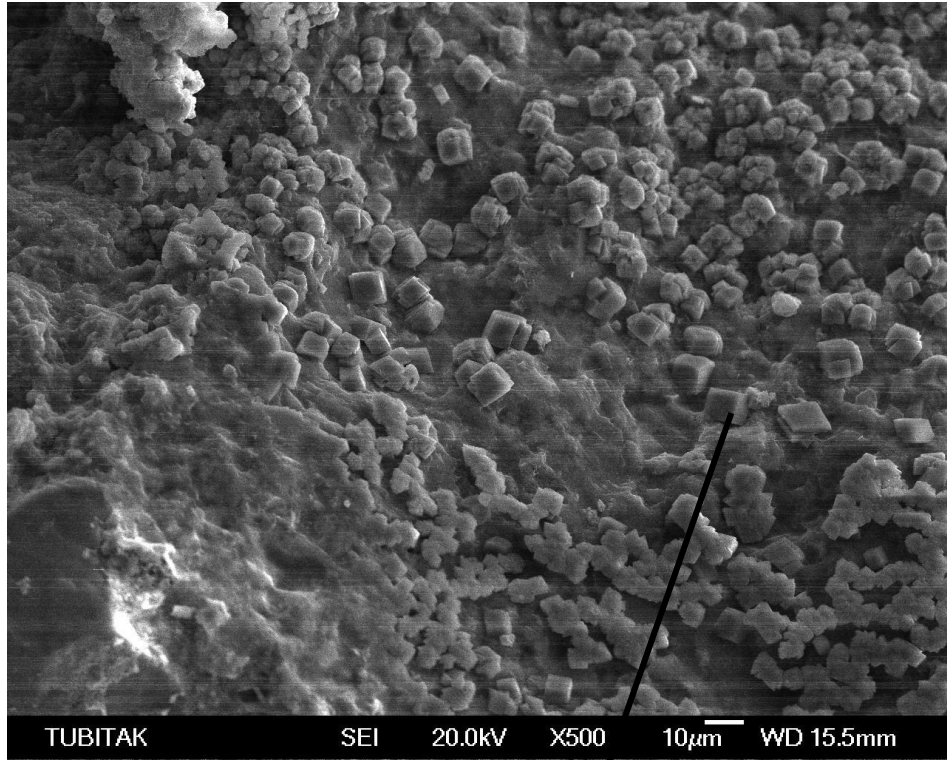


(c)

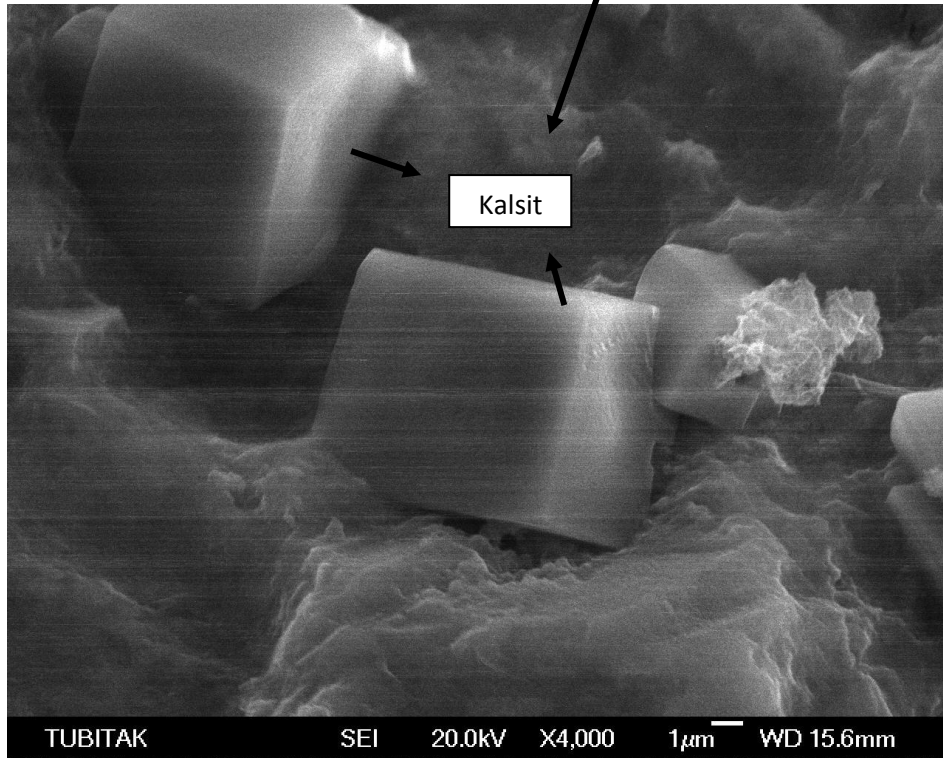


(d)

Şekil 4.31: ÖDZ katkıli harçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. a) DD DZ3-24, b) DD DZ4-24, c) YD Ref., d) DD DZ4-36.



(a)



(b)

Şekil 4.32: ÖDZ katkılı harçların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.  
a) ve b) DD DZ4-12

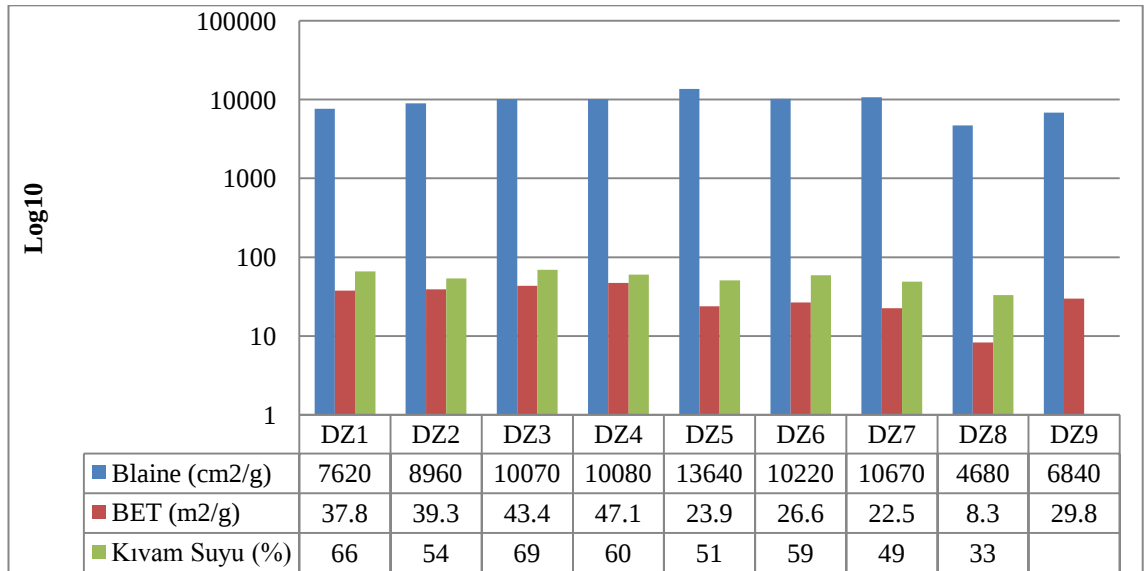
## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

### 5.1. TAZE HARÇ ÖZELİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 5.1.1. Kıvam Suyu ve Priz

Kıvam suyu ve priz tayini harçta değil çimento hamuru ve çimento+ÖDZ hamurunda ölçülmüş parametreler olmakla birlikte, taze harcın davranışı üzerindeki etkileri nedeniyle tespitlerin bu kısımda ele alınması uygun görülmüştür.

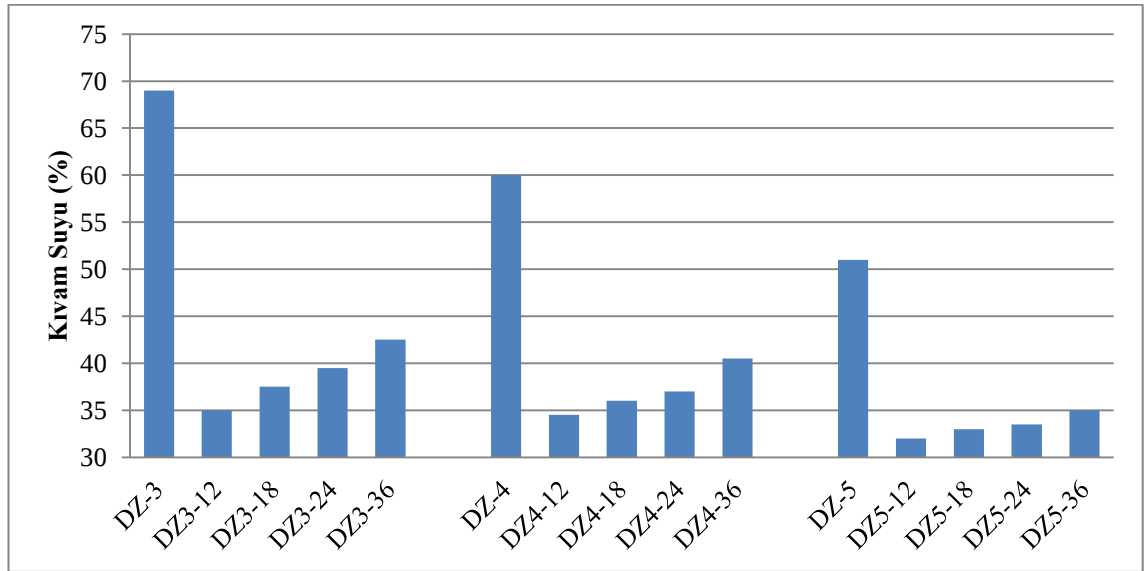
Şekil 5.1’de sunulan, kıvam suyu-Blaine ya da kıvam suyu-BET değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde tutarlılık görülememektedir. Öte yandan, granüler doğal zeolitın ağırlıkça su emme değerleri ile öğütülmüş doğal zeolitın kıvam suyu ihtiyacı arasındaki ilişki (Şekil 4.12) anlamlı sayılabilecek düzeydedir. Bu bakımdan, doğal zeolitın kıvam suyu ihtiyacı üzerindeki ana etkenin malzemenin öğütüldüğü incelik mertebesi değil taşın mineralojik özellikleri olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 5.1: Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine, BET ve kıvam suyu değerleri.

Tablo 4.21 incelendiğinde, sabit kıvamın elde edilebilmesi için ÖDZ katkılı karışımlarda referansa kıyasla gereken su miktarındaki artış dikkati çekmektedir. Çimento hamurunda %29,0 mertebesinde ölçülen kıvam suyu ihtiyacı, çimentoya ikame

edilen DZ miktarındaki artışa paralel olarak; DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu DZ numuneleri ile %36 oranında zeolit katkısı içeren karışımlarda sırasıyla %42,5; %40,5 ve %35,0 mertebelerine yükselmiştir. DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numunelerle ÖDZ+çimento+su karışımından oluşan hamurda ölçülmüş kıvam suyu ihtiyacı (Tablo 4.21) ile, sadece ÖDZ hamurunda ölçülen kıvam suyu ihtiyacı değerleri (Tablo 4.12) paralellik sergilemektedir. Tablo 4.12'deki verilere göre DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numunelerin kıvam suyu ihtiyacı sırasıyla %69, %60 ve %51 olarak ölçülmüştür. Doğal zeolit+çimento karışımından oluşan hamurun kıvam suyu ihtiyacı da, mertebesi farklı olmakla ve DZ ikame oranına göre değişmekle birlikte, genel seyir itibarıyla Tablo 4.12'dekinden farksızdır (Şekil 5.2).



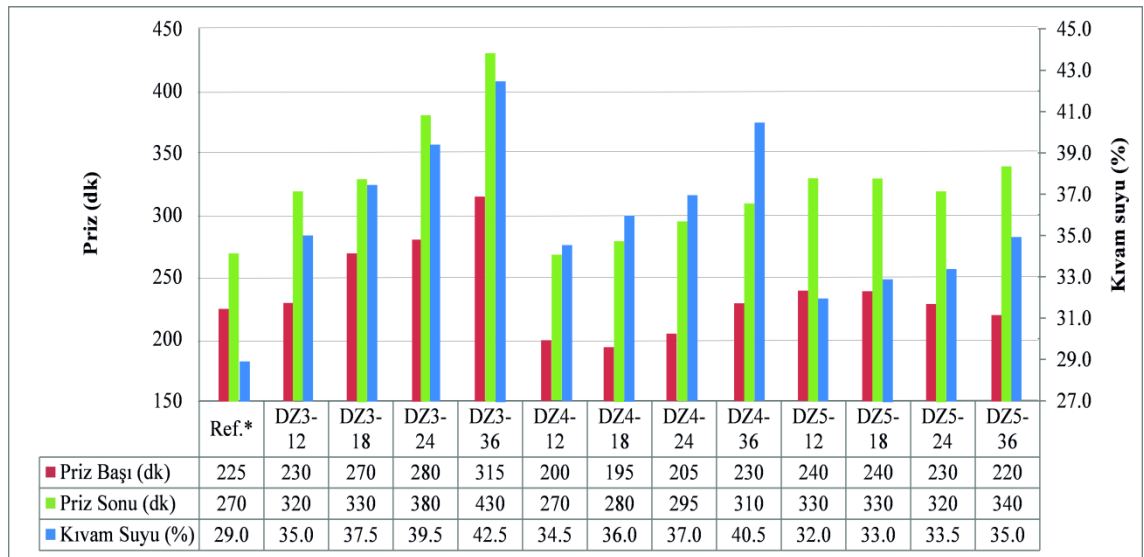
**Şekil 5.2:** Öğütülmüş doğal zeolit hamuru ve çimento+öğütülmüş doğal zeolit hamurunun kıvam suyu ihtiyacı.

Perraki ve diğ. (2010) tarafından yapılan araştırmada da, %10 ve %20 oranında heulandit tipi DZ ikame edilmiş çimento hamurunda, referansa kıyasla belirgin kıvam suyu artışı görülmüştür.

Yılmaz ve diğ. (2007) çimento ve öğütülmüş klinoptilolit karışımından oluşan bağlayıcı ile yürüttükleri çalışmada, artan DZ katkısına bağlı olarak, çok ince bazı çimento parçacıklarının zeolitin boşlukları arasına girmesi suretiyle karışımın Blaine inceliğinde azalma ortaya çıktığını ve karışımın standart kıvam için gerekli su ihtiyacının artış seyri sergilediğini tespit etmiştir. Aynı çalışmada, zeolitin mikroskopik boşluklarına giren çok ince çimento parçacıklarının, karışımın (çimento+öğütülmüş klinoptilolit) özgül

ağırlığında da bileşenlerin kendi özgül ağırlıkları ve karışımdaki oranlarına göre hesapla bulunan ağırlıklı ortalama değerden sapmaya (daha düşük değerler ölçülmesine) neden olduğu belirtilmektedir

ÖDZ+çimento hamurunda ölçülmüş priz değerleri incelendiğinde (Şekil 5.3), DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerle genel tablo itibariyle çimentoya ikame ÖDZ ile, katkı oranındaki artışa bağlı olarak priz başı ve priz sonunda gecikme etkisi görülmektedir. DZ5 kodlu numune ile elde edilen veriler daha tutarsızdır. Ancak ilke olarak, çimentoya ÖDZ ikame edildiğinde referansa kıyasla kimyasal bileşimi farklı bir hamur elde edilmektedir.



\* CEM I çimentolu harç

**Şekil 5.3:** Ögütülmüş doğal zeolit katkılı çimento hamurunda kıvam suyu ve priz değerleri.

Hewlett (2008) ile Perraki ve diğ. (2010), doğal puzolan katkılı çimentoların prizinin Portland çimentosunda ölçülen priz değerlerinden pek farklı olmadığına işaret etmektedir.

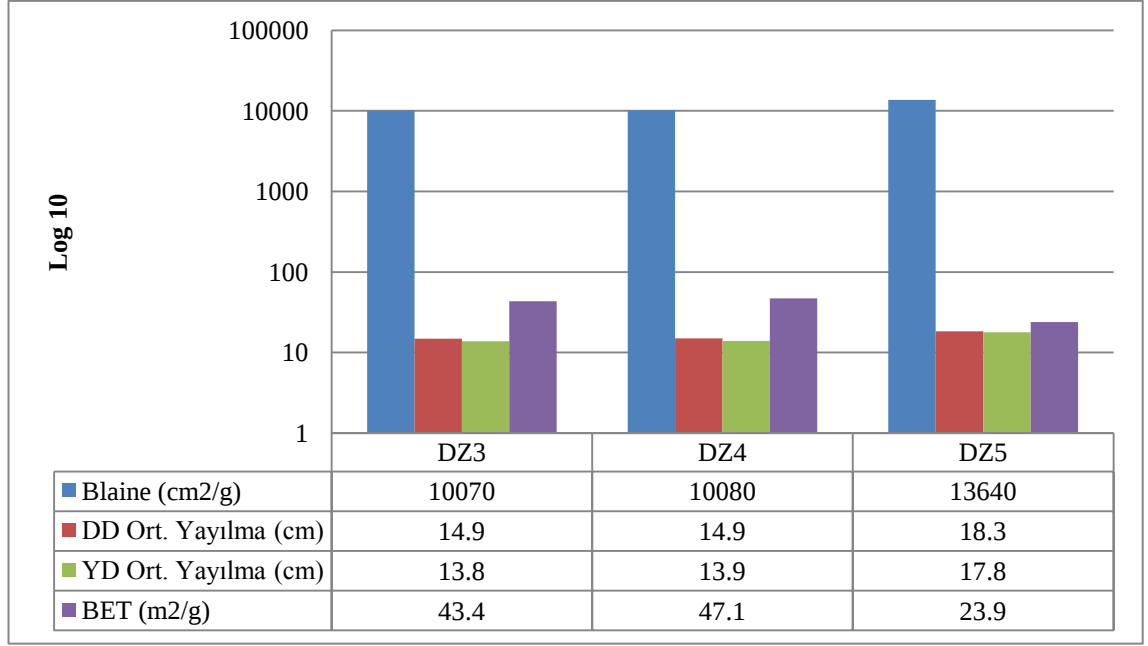
Kimyasal katkı teknolojisinin sunduğu imkanlarla, mineral katkı ilavesi veya ortam şartları nedeniyle kısalan veya uzayan priz süreleri uygulama ihtiyaçları doğrultusunda kolaylıkla telafi edilebilmektedir.

### 5.1.2. Yayılma

Bölüm 4.4.3'te açıklandığı üzere, harç içerisine çimentoya ikame edilerek %12, %24 ve %36 olmak üzere 3 kademede ÖDZ katılmış, ancak YD serisi harçlar üretilirken %36 ÖDZ ikame edilmiş formüllerin kıvamı beklenenden oldukça kuru çıkmıştır. Bu nedenle, daha sona sadece YD serisi için %18 oranında ikame ÖDZ içeren bir seri harç daha üretilmiştir. Bu sayede, çok kuru kıvam sebebiyle temsili performans sergileyememe riski taşıyan %36 ÖDZ içeren karışım serisini değerlendirme dışında tutmak zorunluluğu doğsa bile, YD serisi harçların davranışını 3 ÖDZ kademesi ile yorumlayabilme imkanı elde edilebilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 4.22'de özetlenen yayılma değerleri incelendiğinde, karışımdaki ÖDZ miktarının artışına paralel olarak kıvamda (ve dolayısıyla ölçülen yayılma değerlerinde) önemli bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. DZ5 kodlu ÖDZ numunesi ile üretilen harçlarda DZ4 ve DZ3 kodlu numunelere kıyasla daha yüksek kıvam elde edilmiştir. Aslında bu veriler öğütülmüş doğal zeolitin kıvam suyu tayininde elde edilen değerlerle paralellik göstermekte, ancak özgül yüzeyi ile uyumsuzluk sergilemektedir. Bu durum, ÖDZ katkısının harcın kıvamı üzerindeki etkisinin zeolitin Blaine değeri ile ilişkilendirilmesinin zorluğunu ortaya koymuş ve Blaine yöntemiyle özgül yüzey tayininin  $10000-13000\text{cm}^2/\text{g}$  incelik mertebesindeki malzemelere uygun olmamasına yorumlanmıştır. Öğütülmüş doğal zeolitin Blaine ve yayılma değerleri arasındaki tutarsızlığa karşılık, BET değerleri yayılma ile daha tutarlı bir ilişki göstermektedir (Şekil 5.4). YD ve DD serilerinde üretilen tüm ÖDZ katkılı harçların ortalama yayılma değeri dikkate alındığında, DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerin DZ5'e kıyasla oldukça yüksek seviyedeki BET özgül yüzeyinin taze harcın yayılmasını azaltan (kıvamını düşüren) etkisi net olarak görülebilmektedir (Şekil 5.4).

Ahmadi ve Shekarchi (2010), karışımdaki doğal zeolit miktarı arttıkça viskozitenin de arttığından ve kıvamı düzenlemek amacıyla daha fazla süper akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duyulduğundan söz etmektedir.

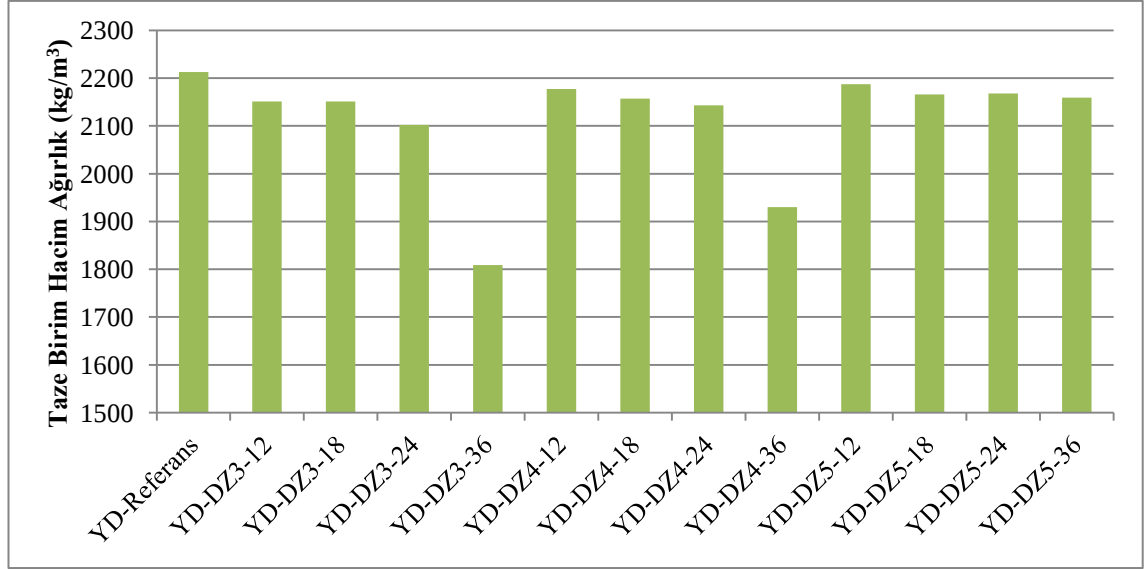


**Şekil 5.4:** Seçilen öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin Blaine, BET ve yayılma değerleri.

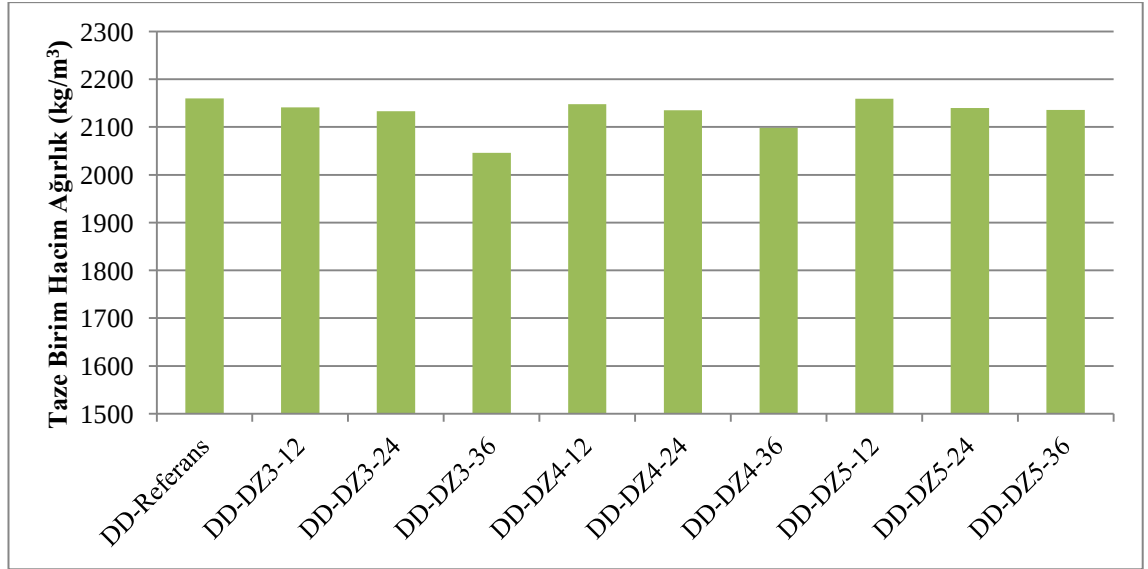
### 5.1.3. Birim Hacim Ağırlığı

Tablo 4.11’den hatırlanacağı üzere, harçlarda kullanılan DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu doğal zeolitlerin granüler haldeki tane yoğunluğu (özellik ağırlığı) taşın boşluk yapısına bağlı olarak farklılaşan ağırlıkça su emme oranı ile gayet tutarlı bir ilişki sergilemektedir. Bu durum, ÖDZ katkılı harçların taze birim hacim ağırlığına da aynı şekilde yansımış ve granüler DZ numunelerinin düşükten yükseğe DZ3, DZ4 ve DZ5 sırasını takip eden tane yoğunluğu sıralaması, taze harcın birim hacim ağırlığında da benzer bir artış seyri ortaya çıkmasına neden olmuştur (Tablo 4.23).

YD serisinde %36 oranında ÖDZ katkısı ile üretilen harçların taze birim hacim ağırlığı, referans bileşime kıyasla DZ3 kodlu numunede %18, DZ4 kodlu numunede %13 ve DZ5 kodlu numunede %2 kadar daha düşüktür. DD serisinde ise %36 oranında ÖDZ katkılı harçların taze birim hacim ağırlığının referanstan farkı daha azdır (DZ3, DZ4 ve DZ5 için sırasıyla %5, %3 ve %1 mertebesinde daha düşük). ÖDZ katkılı harçların taze birim hacim ağırlığının referansinkinden düşük olması, öncelikle ikame doğal zeolitinin özgül ağırlığının çimentonunkinden düşük olması ve ikinci olarak da yüksek oranda ÖDZ katkısı nedeniyle kıvam kaybı ortaya çıkmasının ortak sonucudur (Şekil 5.5).



(a)



(b)

Şekil 5.5: Harçların taze birim hacim ağırlığı, (a) YD serisi, (b) DD serisi.

#### 5.1.4. Hava İçeriği

Tablo 4.24'te görüldüğü gibi, ÖDZ katkılı harçların basınç yöntemiyle tayin edilen hava miktarı, DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerle %36 katkılı seri dışında referans bileşimin hava miktarına yakın değerler sergilemiştir. YD-DZ3-36 ve YD-DZ4-36 numune kodlu, %36 ÖDZ katkılı harçlarda sırasıyla %14,5 ve %11,0 mertebesinde ölçülen değerler, Bölüm 4.4.3'te açıklandığı üzere, düşük kıvam nedeniyle harcın kalıba yeterince boşluksuz yerleştirilememiş olmasıyla ilişkilidir.

## 5.2. SERTLEŞMİŞ HARÇ ÖZELİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

DZ3, DZ4 ve DZ5 kod numaralı ÖDZ katkılı YD ve DD serisi harçların 2, 7, 28 ve 56 günlük eğilme ve basınç dayanımları toplu olarak Tablo 4.25 ve Tablo 4.26’da verilmiştir.

### 5.2.1. Eğilme Dayanımı

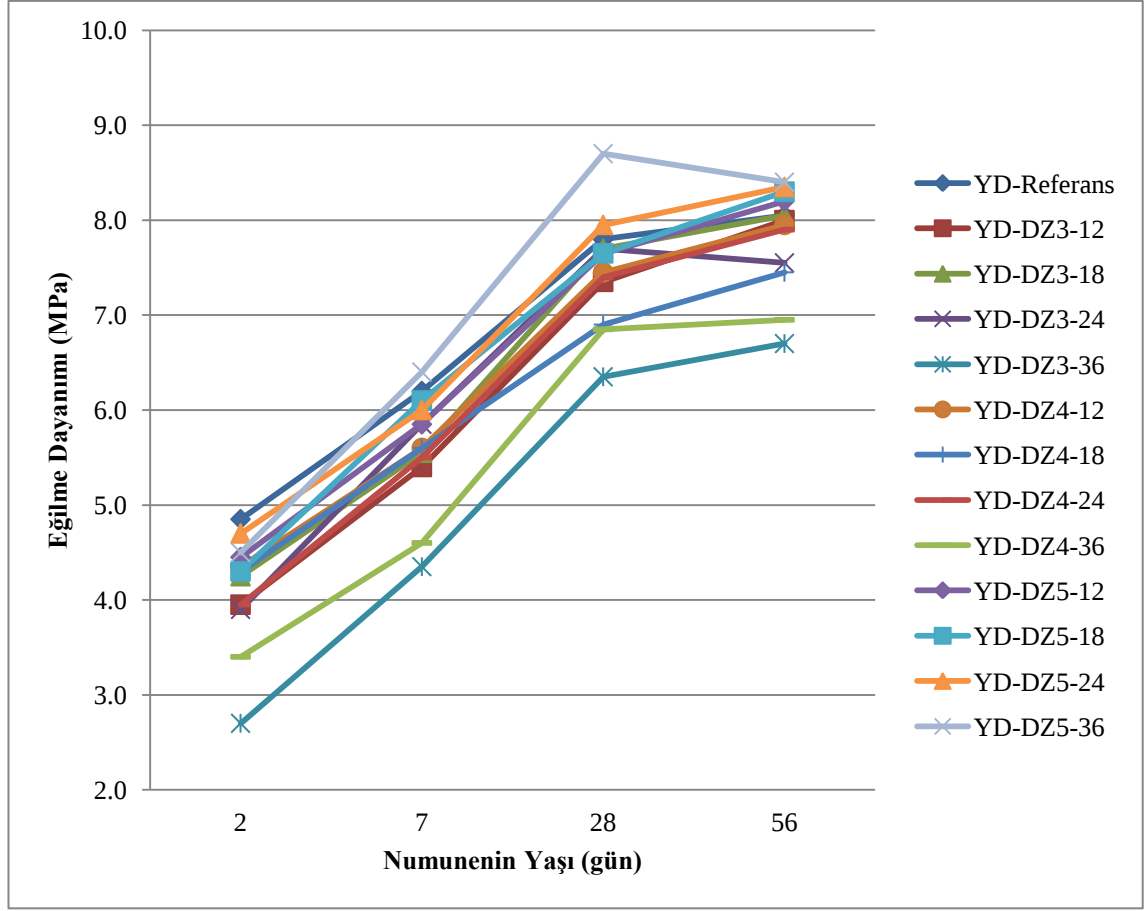
Yüksek dozlu seride üretilen harçların eğilme dayanımları Şekil 5.6’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, DZ5 kodlu ÖDZ katkılı harçların 2 günde referans harcın dayanımının gerisinde kaldığı, ancak 7 ve 28 günde referansa eş değer ve 56 günde ise referansın üzerinde dayanım performansı sergilediği dikkati çekmektedir.

DZ5 kodlu numune dışında, bütün yaşlarda referans harcın performansından geride kalmakla birlikte, ÖDZ katkılı harçlardaki eğilme dayanımı performansı DZ5, DZ3 ve DZ4 şeklinde sıralanmaktadır.

Bölüm 4.4.3’te açıklandığı gibi, düşük kıvam nedeniyle harcın kalıba yeterince boşluksuz yerleştirilememiş olmasıyla ilişkili, düşük veya beklenenden düşük eğilme dayanımı değerleri %36 oranında ÖDZ katkısı içeren numunelerin tamamında dikkati çekmektedir.

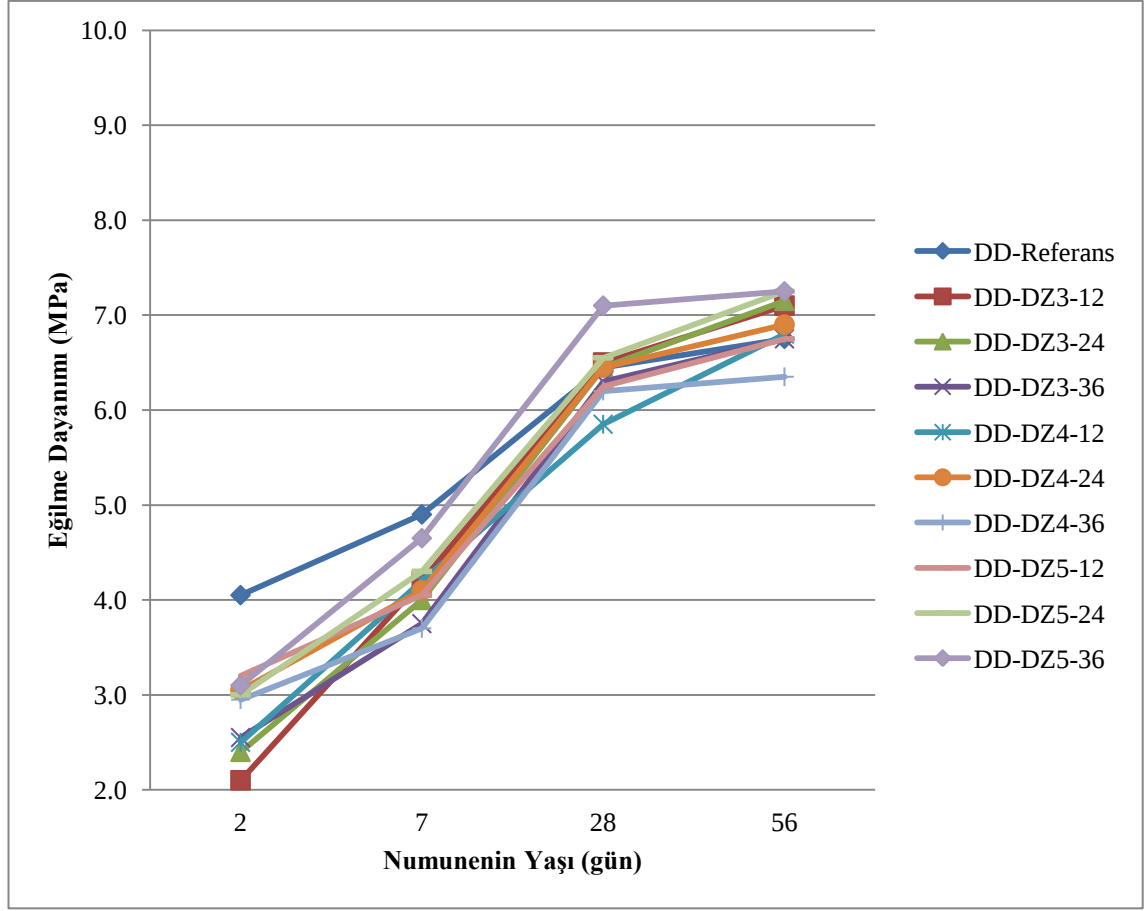
Düşük dozlu seride üretilen harçların eğilme dayanımı Şekil 5.7’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde, ÖDZ numunelerinin üçüyle de, katkılı harçların eğilme dayanımının 2 ve 7 günde referansın gerisinde kaldığı, buna karşılık 28 günde referansa eş değer ve özellikle 56 günde ise referansın üzerinde performans elde edildiği dikkati çekmektedir.

Düşük dozlu serideki harçların eğilme dayanımlarının 56 günde referansın üzerinde bir seviyeye ulaşmasını, bu serinin yüksek dozlu seriye kıyasla nispeten yüksek kıvamları sayesinde numunelerde daha boşluksuz bir yapı elde edilmiş olması ve öğütülmüş doğal zeolitin puzolanik aktivite yoluyla dayanım gelişimine katkısının ileri yaşlarda daha bariz görülmesinin işareti olarak değerlendirmek mümkündür.



**Şekil 5.6:** Yüksek dozlu seride üretilen harçların eğilme dayanımı karşılaştırması.

Çimentoya %36 oranında ikame edilen ÖDZ katkılı harçlar içerisinde yayılması DZ5 kodlu numuneyle kıyasla daha düşük olan DZ3 ve DZ4 kodlu numuneler (Tablo 4.22), ÖDZ katkısı %12'den %24'e çıktığında eğilme dayanımları artış sergilemesine rağmen, %36 katkı mertebesinde gerileme göstermiştir. Bu durum, harçların kalıba standart yöntemle yeterince boşluksuz yerleştirilemeyecek kadar kuru kıvamlı olması ile ilişkilidir. Standardın tarifine göre, taze harcı prizma kalıba yerleştirirken kullanılan şoklama cihazının uyguladığı darbe sayısı sabittir ve kıvamdan bağımsızdır.

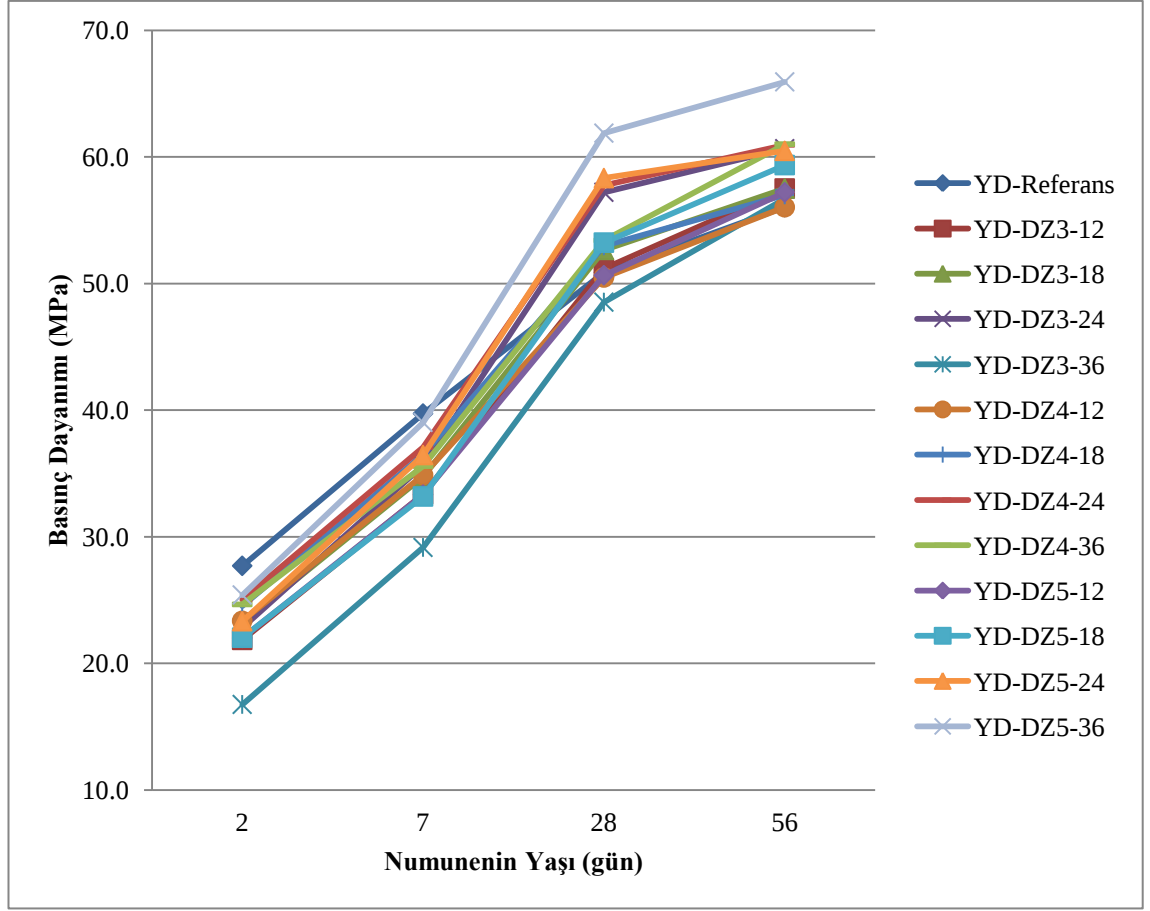


Şekil 5.7: Düşük dozlu seride üretilen harçların eğilme dayanımı karşılaştırması.

### 5.2.2. Basınç Dayanımı

Yüksek dozlu seride üretilen harçların basınç dayanımı Şekil 5.8’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde, üç ÖDZ numunesinde de, katkılı harçların basınç dayanımının 2 ve 7 günde referansın altında kaldığı görülmektedir. Ancak ÖDZ katkılı harçların %12 katkı oranı ile 28 ve 56 günde referansa eşdeğer ve özellikle katkı oranının %18 ve %24 mertebesine çıktığı karışımlarda ise hem 28 ve hem de 56 günde referansın üzerinde basınç dayanımı performansı sergilediği dikkati çekmektedir.

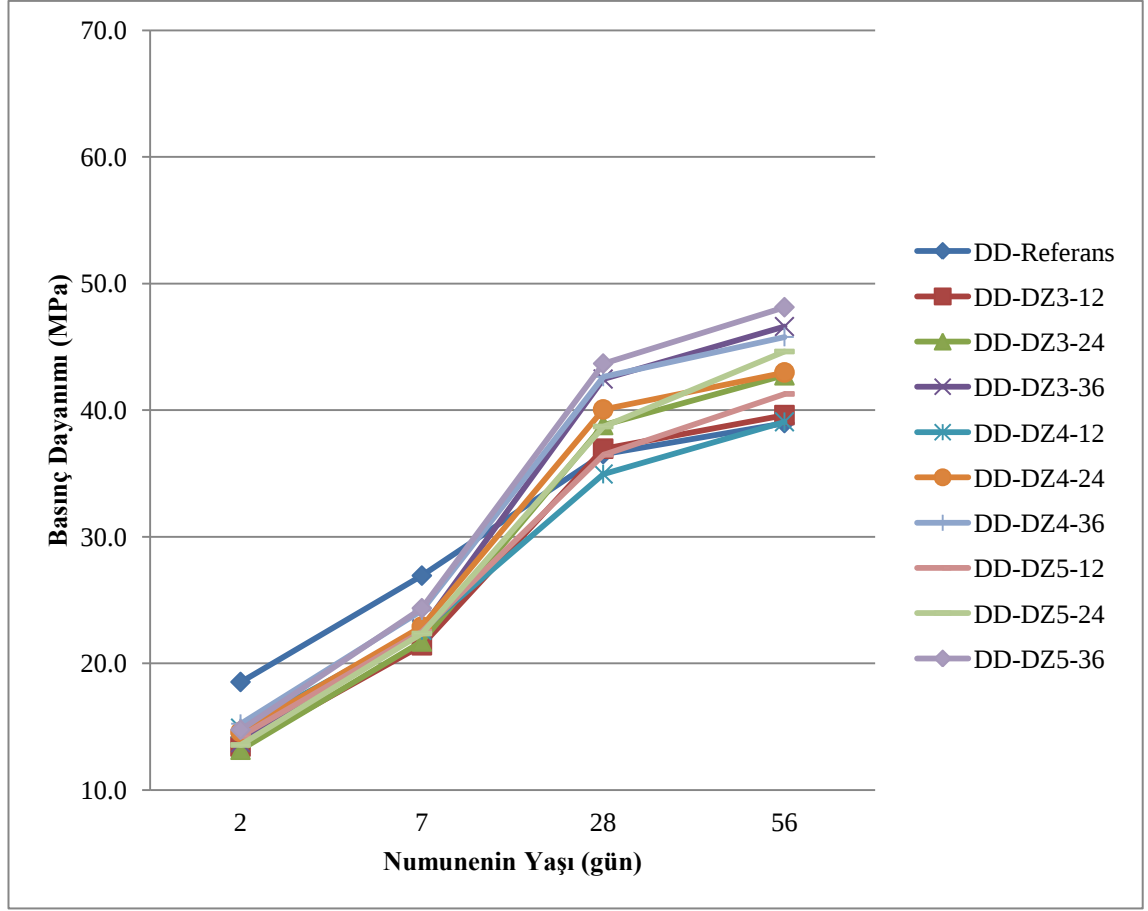
%36 oranında ÖDZ katkılı yüksek dozlu harçların basınç dayanımı değerlendirildiğinde, düşük kıvamları nedeniyle kalıba daha yüksek kıvamlı harçlar kadar boşluksuz yerleştirilememiş olmalarına rağmen, 56 günlük dayanımlar dikkate alındığında, referansa kıyasla DZ4 kodlu numunenin %9 kadar, DZ5 kodlu numunenin ise %18 kadar daha yüksek performans sergilediği görülmektedir.



**Şekil 5.8:** Yüksek dozlu seride üretilen harçların basınç dayanımı karşılaştırması.

Düşük dozlu seride üretilen harçların basınç dayanımı gelişimi (Şekil 5.9) genel durum itibariyle yüksek dayanımlı seridekinden farklı değildir. Öğütülmüş doğal zeolit numunelerinin üçüyle de, katkılı harçların basınç dayanımının 2 ve 7 günde referansın gerisinde kaldığı görülmektedir. Ancak, ÖDZ katkılı harçların %12 katkı oranı ile 28 ve 56 günde referansa eşdeğer ve özellikle katkı oranının %24 ve %36 mertebesine çıktığı karışımlarda ise hem 28 ve hem de 56 günde referansın üzerinde basınç dayanımı performansı sergilediği dikkati çekmektedir.

%36 oranında ÖDZ katkılı düşük dozlu harçların basınç dayanımı, DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu numuneler için 28 günde referansın %16-20 mertebesinde üzerinde performans sergilemiştir. Aynı şartlar altında 56 gün dayanımları ise referansın %17-23 mertebesinde üzerindedir.

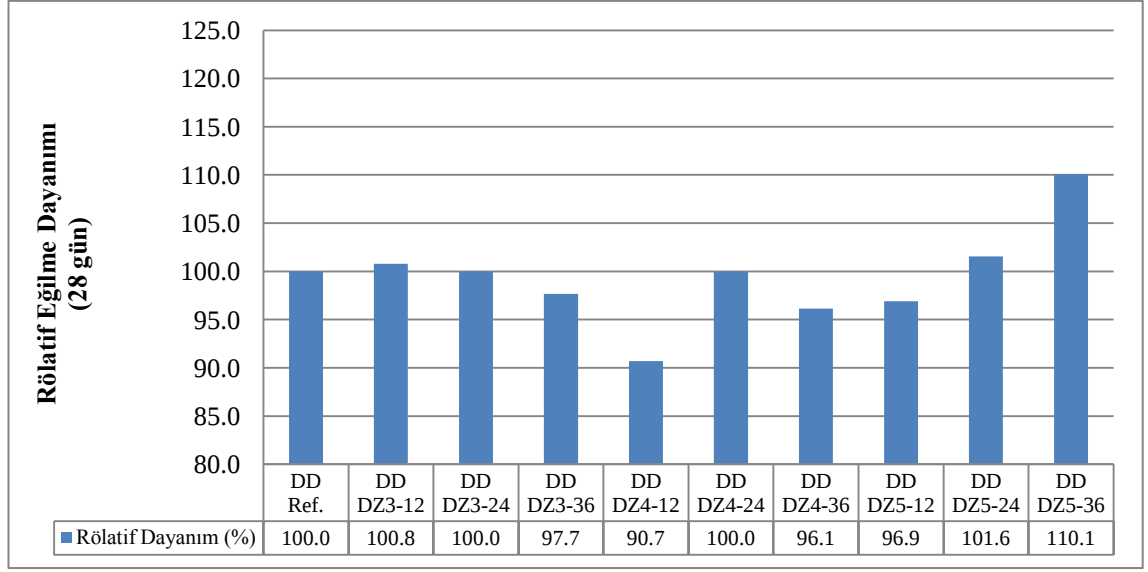


Şekil 5.9: Düşük dozlu seride üretilen harçların basınç dayanımı karşılaştırması.

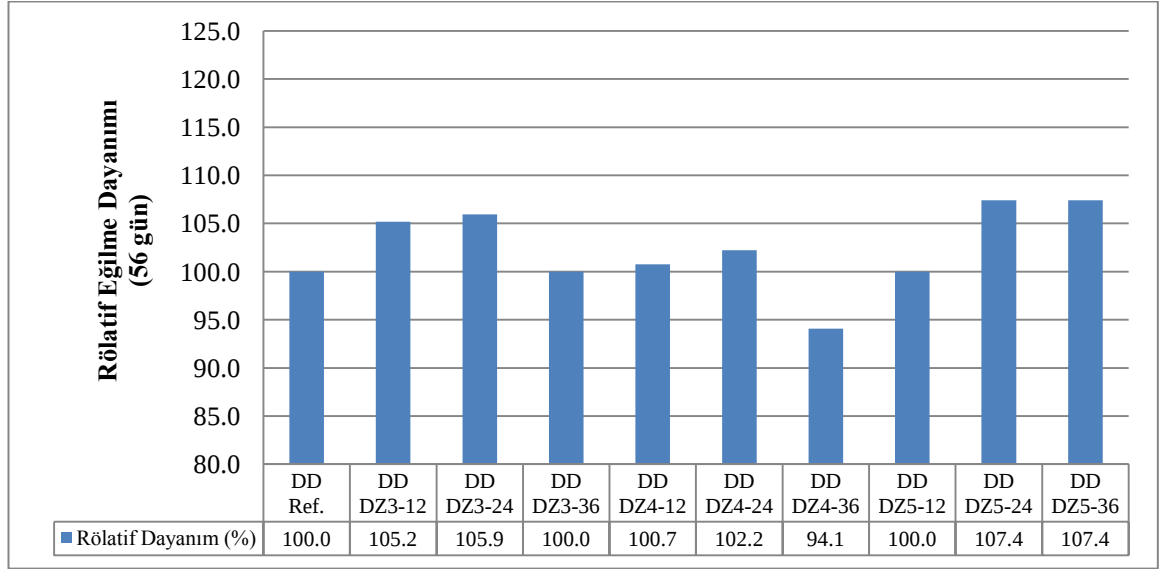
Portland çimentosuna ikame edilen doğal puzolanın sebep olduğu erken dayanım düşüşü genel bir olgudur. Puzolanik çimento ile Portland çimentosunun dayanım gelişimleri arasındaki fark zamanla azalarak ortadan kalkar. Dayanımların eş değer seviyeye gelme zamanı puzolanın aktivitesine olduğu kadar, Portland çimentosu ve puzolanın inceliklerine de bağlıdır. Bu nedenle puzolanik çimentolu beton ve harçların kürlenmesi Portland çimentolu olanlardan daha fazla ihtimam gerektirir (Hewlett, 2008).

Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harçların 28 ve 56 günlük eğilme ve basınç dayanımları DD ve YD harç serilerinin referans harçlarının dayanımıyla kıyaslamalı olarak Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmiştir.

Özellikle DD serisi harçlar, her iki yaşta uygun kıvamın da yardımıyla oldukça tutarlı bir *ÖDZ artışına bağlı basınç dayanımını gelişimi* sergilemektedir. DZ5 kodlu numune ve %36 ÖDZ katkısı ile 56 günde referans harca kıyasla dayanım avantajı %23,5 mertebesine ulaşmaktadır.

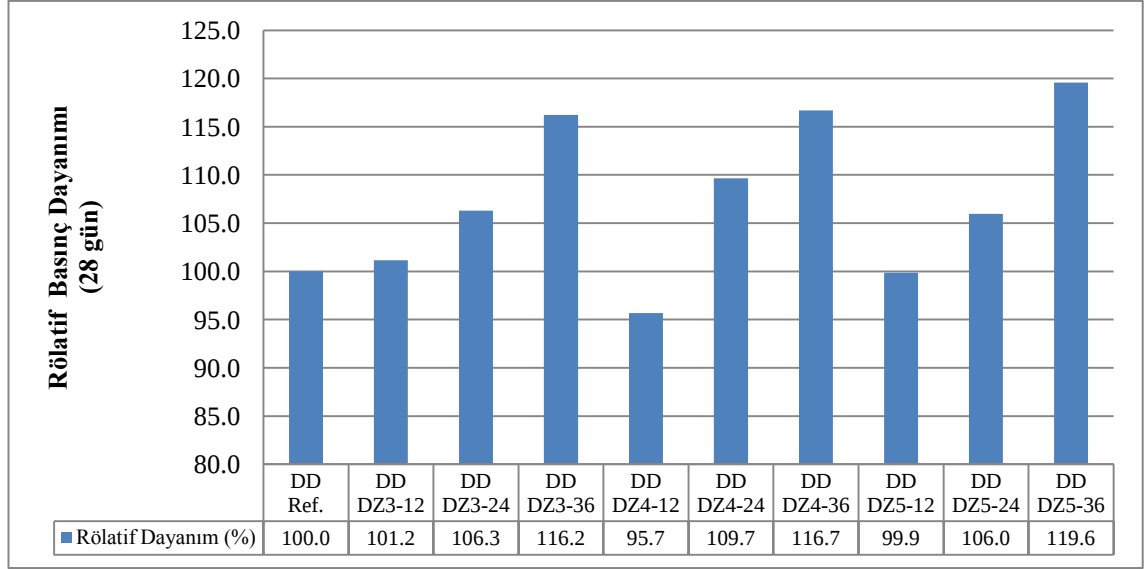


(a)

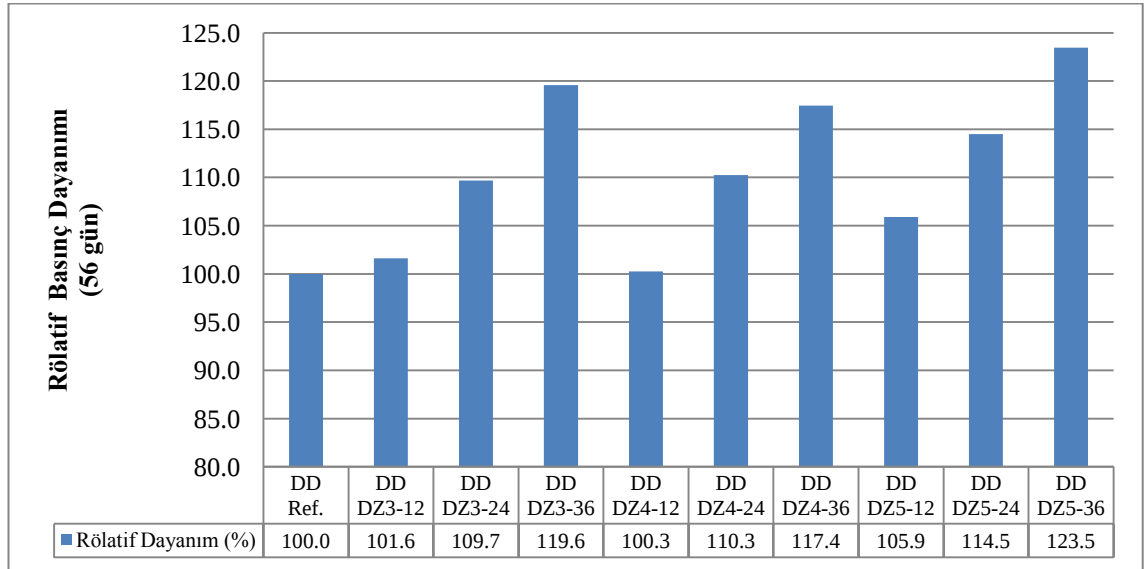


(b)

**Şekil 5.10:** DD serisi harçların rölatif eğilme dayanımı ilişkisi, (a) 28 gün, (b) 56 gün.



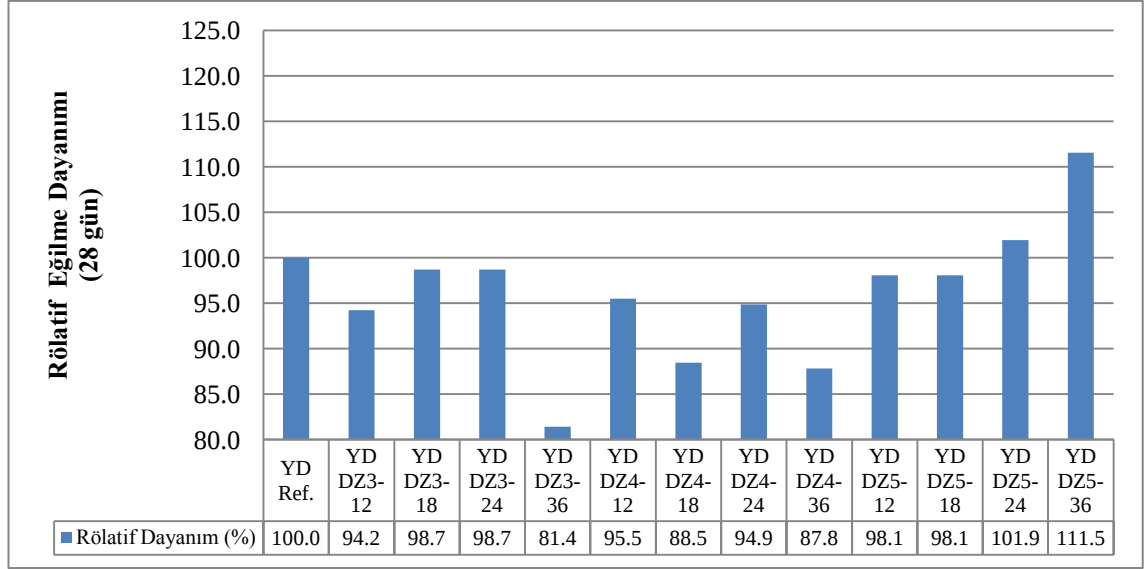
(a)



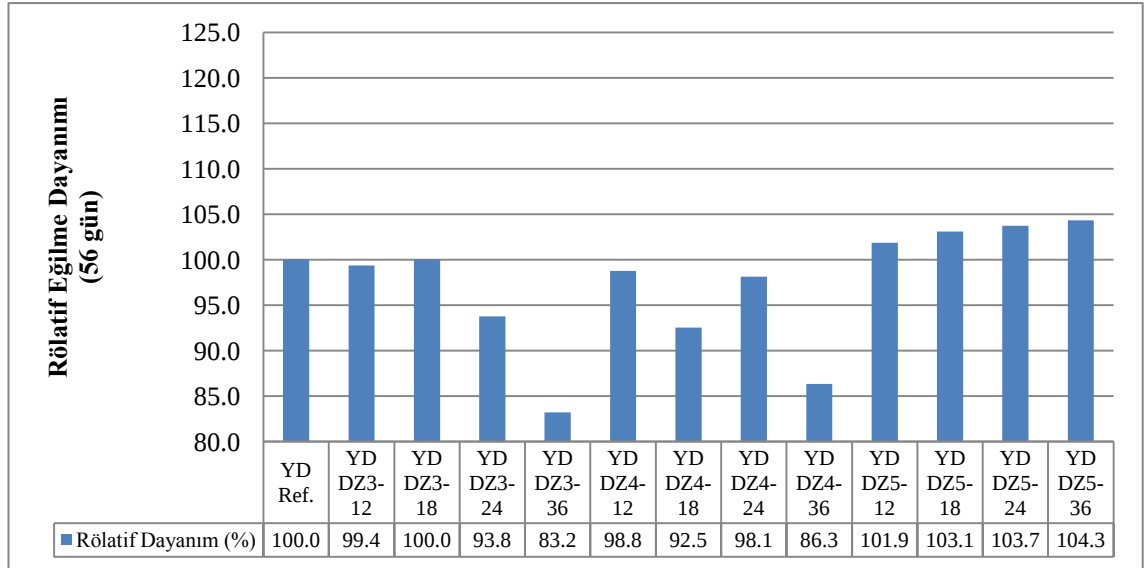
(b)

**Şekil 5.11:** DD serisi harçların rölatif basınç dayanımı ilişkisi, (a) 28 gün, (b) 56 gün.

Sabit S/Ç oranı ile boşluksuz yerleştirme için gerekli kıvamın elde edilebildiği %12, %18 ve %24 ÖDZ katkısı ile YD serisi harçlarda da durum aynıdır. DZ5 kodlu numune ve %36 ÖDZ katkısı ile 56 günde referans harca kıyasla elde edilen dayanım avantajı %17,7 mertebesinde.



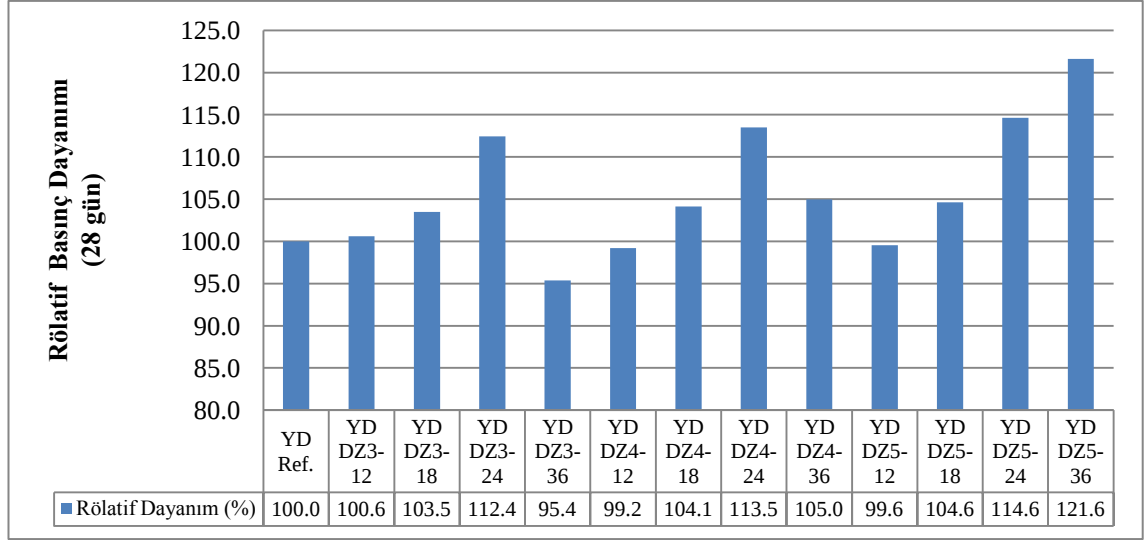
(a)



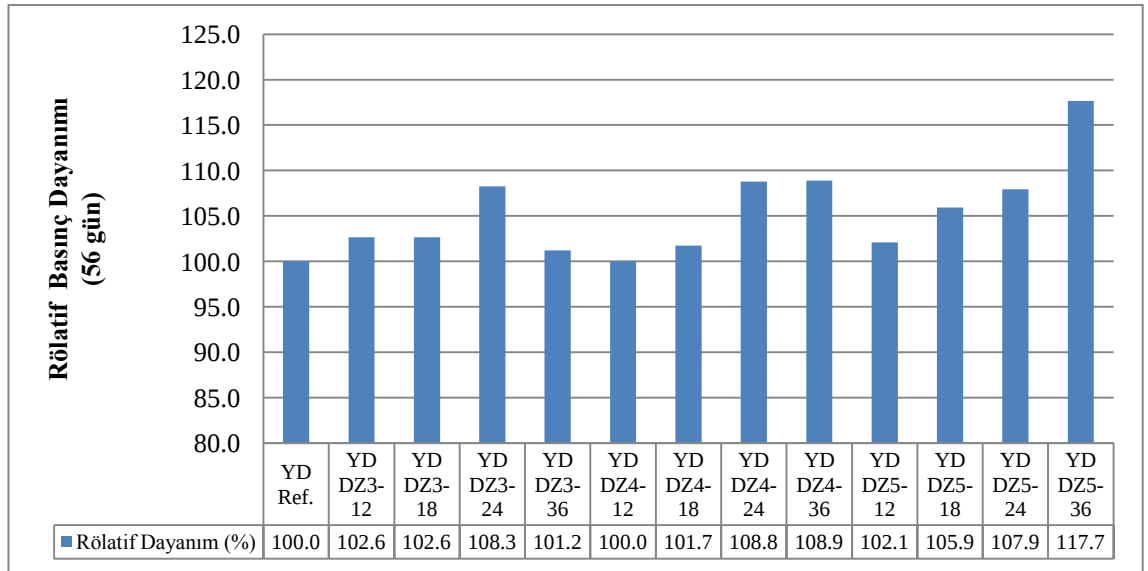
(b)

**Şekil 5.12:** YD serisi harçların rölatif eğilme dayanımı ilişkisi, (a) 28 gün, (b) 56 gün.

DD ve YD harç serilerinin DZ5 kodlu numune ile sunduğu dayanım üstünlüğü ortalama %20 mertebesinde kabul edilecek olursa, saha şartlarında ÖDZ katkısı ile elde edilen durabilite performansına ilaveten, dayanım performansı ile bir üst sınıf beton dayanımına ulaşılması da mümkün görünmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 5. 13:** YD serisi harçların rölatif basınç dayanımı ilişkisi, (a) 28 gün, (b) 56 gün.

Bu çalışmada, ÖDZ katkısının harcın davranışı üzerindeki etkilerinin daha kesin görülebilmesi için, harç bileşimine kıvamı düzenlemek amacıyla kimyasal katkı ekleyerek ilave bir parametre daha oluşturmaktan kaçınılmıştır. Endüstriyel uygulama şartları altında, DZ katkılı harçların (özellikle yüksek oranda ÖDZ içerenler) düşük kıvamının akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılarak ve S/Ç oranını artırmadan referansa eş değer kıvama yükseltilmesi durumunda (ki bu durumda prizmalarda daha yüksek kompasite elde edilebilecektir), daha yüksek eğilme ve basınç dayanımı değerlerine ulaşılacağı ve referans bileşime kıyasla daha büyük avantajlar elde edilebileceği görülmektedir. %36 ÖDZ katkısıyla düşük dozlu seride üretilen harçların,

referansa kıyasla yüksek dozlu seride üretilenlerden daha yukarıda dayanım performansı sergilemiş olması bu tezi desteklemektedir.

Kimyasal katkı ilavesiyle referans ve DZ katkılı bütün harç karışımlarının hedef kıvamı eş değer seviyeye getirilecek olursa, ÖDZ katkılı harç karışımlarının tamamında, puzolan ilave edilen karışımların genel mekanik davranışı olarak ortaya çıkan erken dayanım düşüşü de bir ölçüde telafi edilebilir. İlaveten, daha yüksek kimyasal katkı dozlarıyla S/Ç oranı referansının de aşağısına çekilerek, ÖDZ katkılı karışımlar lehine bir durum elde edilebilir. Bu optimizasyon çalışmalarının tamamında uygulama koşulları ve fayda-maliyet dengesi gözetilmek durumundadır.

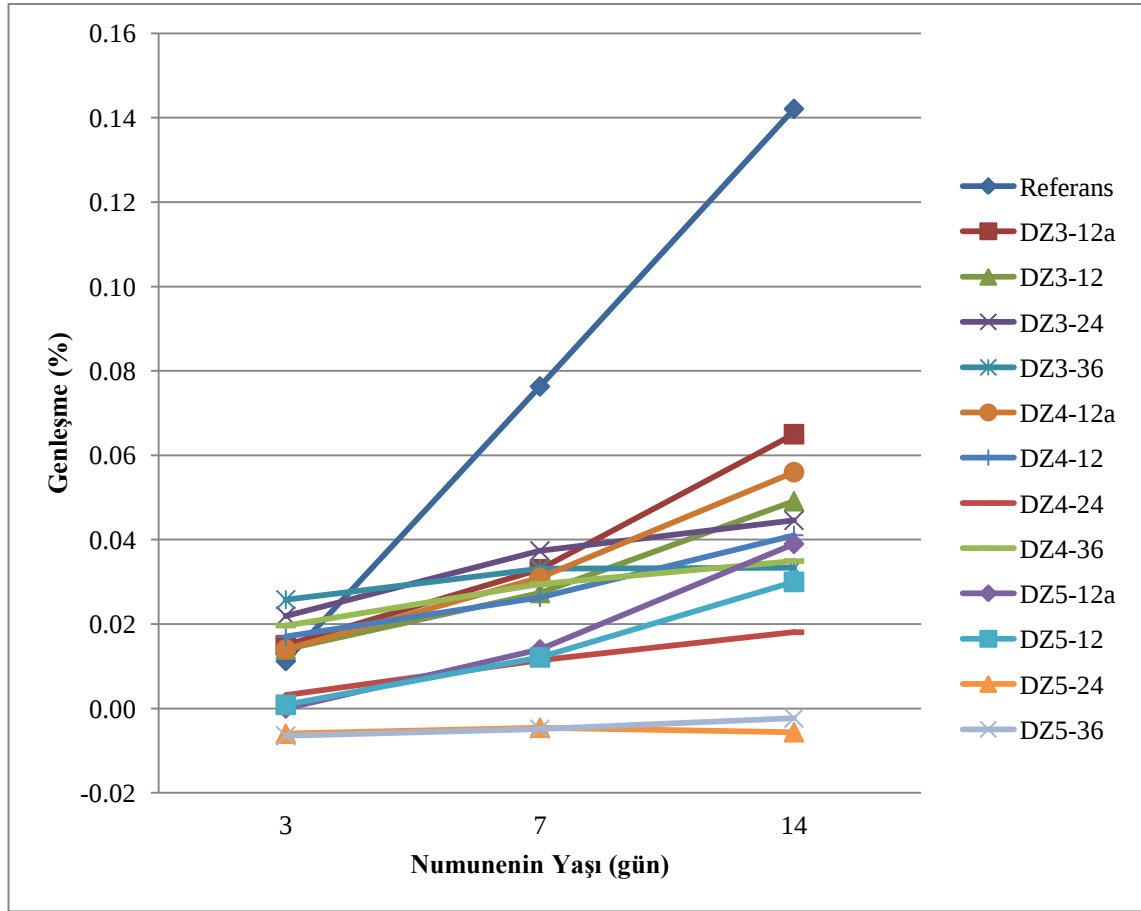
### **5.3. DURABİLİTE DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

#### **5.3.1. Alkali-Silis Reaksiyonu Deney Sonuçları**

“ASTM C1567-08 Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)” standardına uygun olarak hazırlanmış ve test edilmiş referans ve ÖDZ katkılı harç prizmalarının genleşme oranları Tablo 4.28’de ve Şekil 5.14’te verilmiştir. ASTM C1567-08 standardı, çimento ve doğal puzolan karışımları için 16 gün sonunda ölçülen genleşmenin %0.1’den düşük oranda olması halinde saha uygulamalarında zararlı reaksiyonla karşılaşılmayacağını ifade etmektedir. Prizmaların genleşme oranları incelendiğinde, en düşük ÖDZ katkı oranı olarak seçilen %12 mertebesinde, standardın sınır olarak tanımladığı %0.1 genleşme miktarının yarısının bile altında değerlerle karşılaştığı dikkati çekmektedir. Deneye tabi tutulan 3 ÖDZ numunesi arasında en düşük genleşme DZ5 kodlu numune ile hazırlanan harç prizmalarında ortaya çıkmıştır (Tablo 4.28).

Bölüm 4.4.6.1’de açıklandığı gibi, bu deney için hazırlanan harç prizmalarının bileşimi, modifiye edilmiştir. Standardın tarif ettiği yöntemle, doğal zeolit in çimentonunkinden düşük olan özgül ağırlığı nedeniyle karışımın toplam hacimde artış meydana gelmektedir ve bu durumun mineral katkının etkinliğini azaltacağı düşünülmüştür. DZ3-12a, DZ4-12a ve DZ5-12a kodlu ve standarda tam uyarak hazırlanmış prizmalarla, modifiye bileşimle hazırlanmış DZ3-12, DZ4-12 ve DZ5-12 kodlu prizmalar arasındaki

14 günlük genişleme değerleri farkı modifiye bileşimler lehine anlamlılık sergilemektedir (Tablo 4.28 ve Şekil 5.14).



Şekil 5.14: Harçların ASR genişleme oranı karşılaştırması (ASTM C1567-08 standardına göre).

Tablo 4.27 incelendiğinde,  $\text{Na}_2\text{O}$  eş değer ( $\text{Na}_2\text{O}+0,658\text{K}_2\text{O}$ ) alkali miktarının ÖDZ katkılı harç karışımlarında, %12 katkı ile bile referans harcının üzerinde değerler sergilediği ve hatta DZ4 kodlu doğal zeolitle %36 katkı içeren harç bileşiminde referansın iki katını aştığı görülmektedir.

Alkali-silis reaksiyonu, agregadaki aktif silis bileşenleri (opal, kalsedon ve tridimit) ile çimentodaki alkaliler arasında gelişir. Reaktif silis türleri opalin, kalsedonlu çört, silisli kireçtaşı, riolit ve riolitik tuf, dasit ve dasitik tuf, andezit ve andezitik tuf ve fillitler içerisinde görülür. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan alkali-silis jeli agregadaki (reaktif silisin bulunduğu) zayıflık düzlemleri ve boşluklar içerisinde veya agrega yüzeyinde oluşur. Bu jel suyla temas ettiğinde şişerek hacmini artırır ve hidrate çimento hamurunda çatlama ve parçalanmaya neden olur (Neville, 1997).

Alkali-silis reaksiyonunu önleyici bir tedbir olarak bir çok teknik şartname çimentodaki  $\text{Na}_2\text{O}$  eş değer alkali miktarını max %0,6 ile sınırlandırmaktadır. Ancak bu reaksiyonda  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  farklı etkinliktedir ve alkali-silis reaksiyonu riski değerlendirilirken yaygın olarak başvurulduğu gibi çimentonun  $\text{Na}_2\text{O}$  eş değer toplam alkali miktarının değil çözünebilen alkali miktarının dikkate alınması gerekir (Akman, 2000).

Puzolanların alkali-silis reaksiyonu riskini azaltıcı rolü, öncelikle boşluk çözeltisi (pore solution) içindeki alkalilerle girdikleri reaksiyonun, kum veya iri agregaya boyundaki reaktif silis minerallerinin alkalilerle reaksiyonundan daha hızlı gerçekleşmesiyle açıklanmaktadır. Puzolanların bu avantajı incelik ve şekilleriyle ilgilidir, aksi takdirde alkali-silis reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşmeye dahil olmaları (genleşmeyi artırmaları) riski de bulunmaktadır (Hewlett, 2008).

Zeolitler, iyon değişimi ( $\text{Na}_2\text{O}$  içindeki  $\text{Na}^+$ 'un zeolitin bünyesine geçmesi) yoluyla boşluk çözeltisinin alkali iyon konsantrasyonunu düşürmekte ve çimentodaki alkalilerle agregadaki reaktif silis arasında gelişerek agregaya yüzeyinde alkali silikat jeli oluşturan reaksiyonu önlemektedir (Feng ve diğ., 1988).

Çalışmada elde edilen bulgular Naiqian ve diğ. (2002) tarafından, %30 oranında DZ içeren ve  $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğer alkali oranı %1,42 ve %1,82 olan çimento ile 1:2,25 kum:çimento oranlı harçlarla elde edilen ASR reaksiyonuna bağlı genleşme gerilemesi ile paralellik sergilemektedir. Araştırmacılar bileşiminde %60 oranında klinoptilolit bulunan doğal zeolitin sağladığı bu faydayı, zeolitin iyon değişimi yoluyla çimento hamurunda alkali iyonlarının birikmesini önleyici rolüne ve reaktif agregaya ile çözeltideki alkali iyonlarının reaksiyonunu ortadan kaldırmasına bağlamıştır.

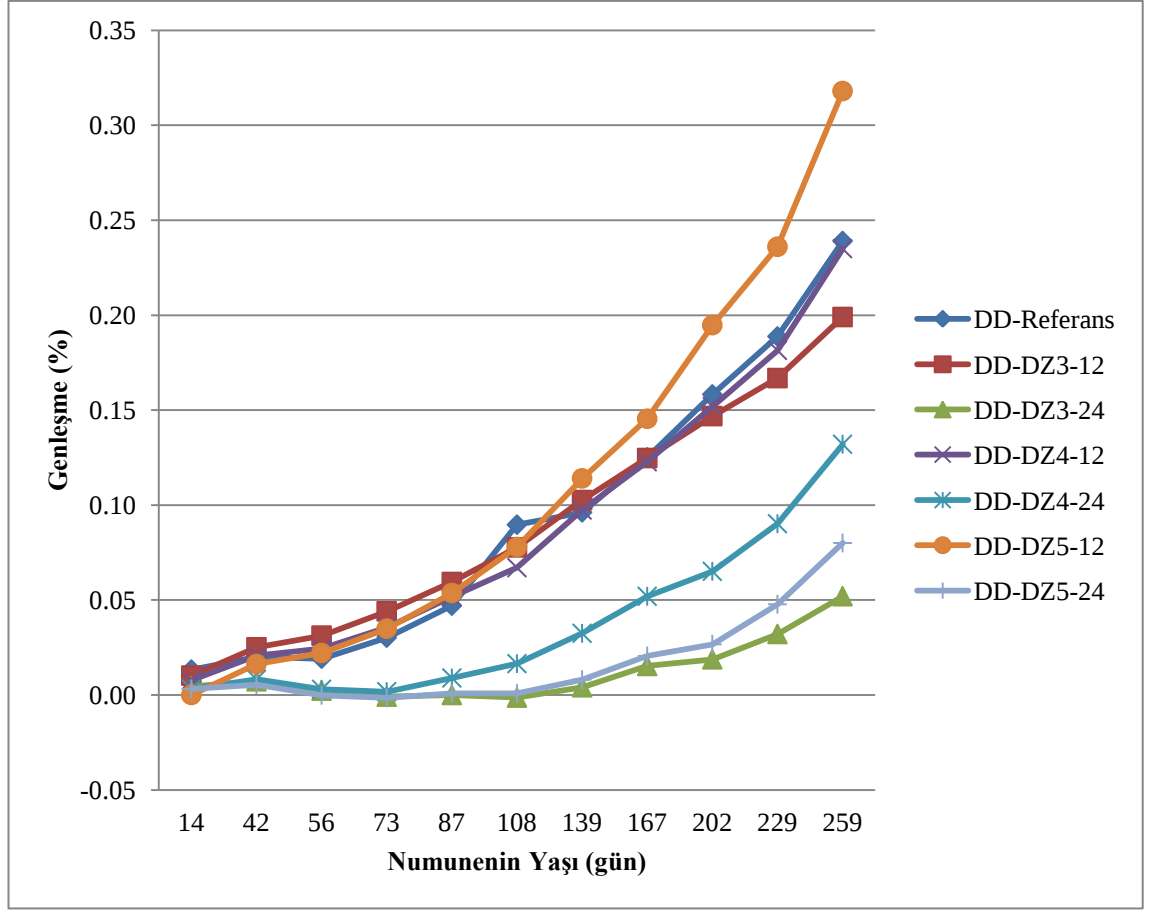
Benzer bir çalışmada Feng ve diğ. (1988), %65 oranında klinoptilolit içeren,  $10000\text{cm}^2/\text{g}$  Blaine inceliğinde doğal zeoliti çimentoya %10 oranında kattıklarında harç prizmalarında çok bariz genleşme gerilemesine işaret etmiştir. Araştırmacılar ÖDZ ilavesi ile doygun haldeki  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  çözeltisinde pH seviyesinin gerilemesine ve iyon değişimi, adsorbsiyon ve puzolanik reaksiyon yoluyla  $[\text{Na}^+]$ ,  $[\text{K}^+]$  ve  $[\text{Ca}^{2+}]$  seviyesindeki düşüşe ve bu değişikliklerin doğal zeolitin inceliğindeki artışa paralel olarak arttığına dikkat çekmektedir. Ayrıca, doğal zeolitin prizmalardaki genleşmeyi azaltıcı rolünün boşluk çözeltisi içindeki  $[\text{OH}^-]$  iyonlarını azaltma kapasitesiyle ilişkisini de ortaya koymuşlardır.

Ramyar ve Andiç (2003) heulandit içeren doğal zeolitın ASR hasarını önleme etkinliğinin, inceliğinin azalması ve ikame oranının artması ile paralel olarak arttığına işaret etmektedir. Araştırmacılar, yüksek oranda DZ katkısının puzolanik reaksiyon yoluyla boşluk çözeltisinin pH değerini düşürmesinden, düşük oranda DZ katkısının ise iyon değişimi mekanizmasıyla genleşmeyi azalttığından söz etmektedir.

Bu çalışmanın ayrıntılı deneyleri kapsayan ikinci aşamasında katkı olarak kullanılan öğütülmüş doğal zeolitlerin Blaine inceliği  $10000\text{cm}^2/\text{g}$  ve üzeri mertebededir. Ancak bileşimdeki klinoptilolit miktarı, yukarıda anılan Naiqian ve diğ. (2002) ile Feng ve diğ. (1988) referanslarındaki zeolitlerin klinoptilolit miktarından düşüktür (özellikle DZ4 ve DZ5, Tablo 4.1). Benzer zeolit içeriği koşullarında ASR reaksiyonunu önleyici etkinin daha fazla olması beklenebilir. Öte yandan, harçtaki alkali-silis reaksiyonları bir çok parametrenin etkisi altında geliştiği için (bileşimdeki toplam çözünebilen  $\text{Na}_2\text{O}$  eş değer alkali miktarı, agregadaki reaktif silis miktarı, DZ mineralinin türü ve konsantrasyonu, çimentoya ikame oranı ve inceliği gibi), farklı çalışma sonuçlarının bire bir karşılaştırabilmesi de mümkün görünmemektedir.

### 5.3.2. Sülfat Etkisi Deney Sonuçları

Sülfat çözeltisinde saklanmış harç prizmalarının genleşme seyri Şekil 5.15'te verilmiştir. Çimentoya %12 ve %24 oranında iki ayrı kademedeki ÖDZ ikame edilen katkılı harçların, %12 katkı içeren seride referansın genleşme seyrine oldukça paralel bir gelişme gösterdiği görülmektedir. DZ3 ve DZ4 kodlu doğal zeolitle üretilen harç numunelerinin davranışından farklı olarak, DZ5 kodlu doğal zeolitle üretilen harç numuneleri 139 gün ölçümünden itibaren referansın genleşme değerlerinin üzerinde genleşme değerleri sergilemiştir.



Şekil 5.15: Harç prizmalarında sülfat etkisiyle genleşme oranı karşılaştırması.

Buna karşılık %24 katkı içeren seride ise, en kötü durumdaki DZ4 kodlu doğal zeolitle bile referansın yarısı mertebesinde genleşme geliştiği ve hatta DZ3 kodlu doğal zeolitle genleşmenin referansinkinin sekizde biri mertebelerine kadar gerilediği dikkat çekmektedir. Yüksek oranda ÖDZ katkısının genleşme kontrolü üzerindeki olumlu etkisi özellikle 56. günden itibaren bariz şekilde görülebilmektedir. %24 katkı içeren serideki harç prizmalarının genleşmesi yüksekten düşüğe doğru DZ4, DZ5 ve DZ3 şeklinde sıralanmaktadır. DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerle üretilen harçlarının ikame ÖDZ oranı %12'den %24'e yükseldiğinde, 259 gün sonundaki genleşme miktarı %12 ÖDZ katkılı harçların dörtte biri mertebesine gerilemektedir. Bu veriler ışığında, %24 oranında ÖDZ katkılı harçların sülfat hasarına karşı referans CEM I 42.5R çimentolu harçtan çok daha dayanıklı olduğu söylenebilir.

Bölüm 4.4.6.2'de açıklandığı gibi, bu deneyde tercih edilen harç bileşimi; çimento dozu, S/Ç oranı ve çözeltideki  $MgSO_4$  konsantrasyonu bakımından standardın tarifinden

çok daha elverişsizdir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, %24 ÖDZ katkılı harçların sağladığı fayda daha kayda değer bulunmuştur.

259 gün boyunca sülfat çözeltisinde tutulan prizma numunelerinin deney sonrası görüntüsü Şekil 5.16’da verilmiştir.



**Şekil 5.16:** Harç prizmalarının sülfat hasarı deneyi tamamlandıktan sonraki durumu

Harçta veya betonda sülfat hasarının birincil nedeni, çimentodaki  $C_3A$  (trikalsiyum alüminat) fazı ile ortamdaki (zemin veya yeraltı suyundaki) sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) arasında gelişen reaksiyonla ortaya çıkan ve genleşme davranışı sergileyen etrenjit minerali oluşumudur (Rodriguez-Camacho ve Uribe-Afif, 2002). Bu nedenle, çimentodaki  $C_3A$  miktarının sınırlandırılması, betonda sülfat hasarı oluşmasını önleyici tedbirlerin başında yer alır.

“ASTM C150/C150M-12 Standard Specification for Portland Cement” isimli standart, çimentodaki  $C_3A$  fazını orta derecede sülfat riskine maruz uygulamalar için önerilen

Tip II çimentosunda %8 ve yüksek derecede sülfat riskine maruz uygulamalar için önerilen Tip V çimentosunda ise %5 olarak sınırlandırmıştır. Prensip olarak, CEM I çimentosuna puzolan ilavesi, karışımda bulunan ve sülfat hasarının ortaya çıkmasında büyük rolü olan klinker kökenli  $C_3A$  fazının miktarını azaltıcı bir etki yapmaktadır. Bu çalışmada kullanılan CEM I çimentosunda  $C_3A$  fazının oranı %8,67'dir (Tablo 4.14). %24 oranında ÖDZ katkısı içeren harç için TS EN 197-1 ilkelerine göre hesaplanan katkı miktarı (Tablo 5.3), çimento+mineral katkıdan oluşan bağlayıcı içindeki  $C_3A$  miktarının %6,5 mertebesine gerilemesine yol açmaktadır.

Karakurt ve Topçu (2011), sülfat hasarına karşı direncin kompozit malzeme içerisindeki etrenjit, alçıtaşı ve tomasit ile ilişkili olduğuna ve DZ katkısının etrenjit oluşumunu ve permeabiliteyi azaltıcı rolüyle sülfat hasarına karşı koruyucu bir rol oynadığına işaret etmektedir. Janotka ve diğ. (2003) ise, bileşiminde %35 DZ bulunan BS EN 197-1'e uygun CEM II/B-P tipi çimento ile harçlarda taze ve sertleşmiş mühendislik özelliklerinin Portland çimentosununkine eşdeğer olduğunu, ve ilaveten sülfat hasarına direnç performansının bünyesinde %3,5  $C_3A$  fazı bulunduran sülfata dayanıklı çimentonunkinden farksız olduğunu ifade etmektedir.

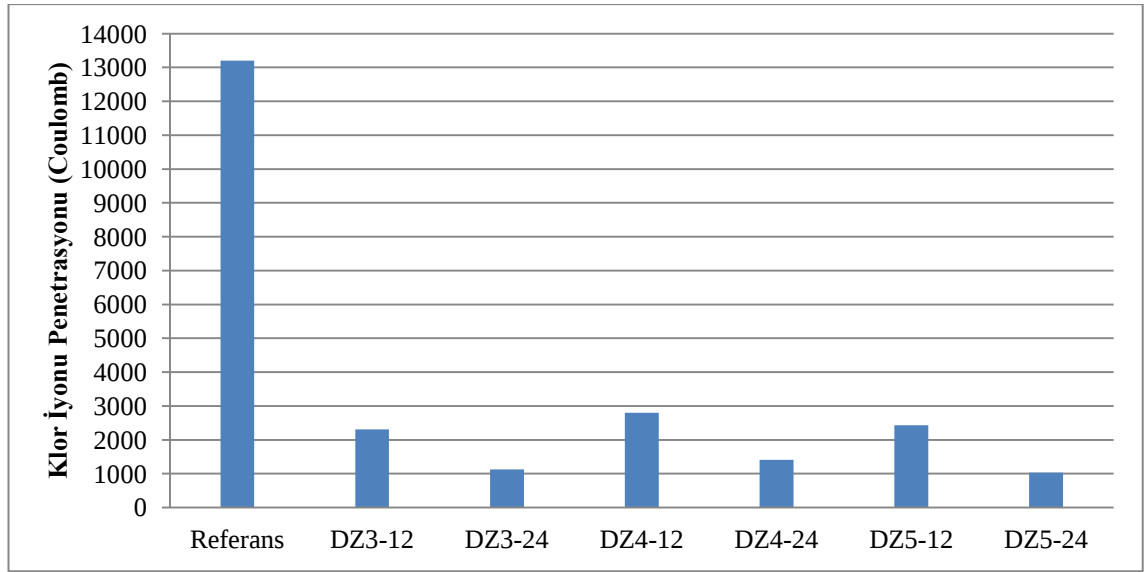
Betonun sülfat hasarına karşı direncini artıran temel önlemler; düşük S/Ç oranı, hava sürükleyici katkı kullanımı (bu iki önlem de sonuçta permeabiliteyi azaltıcı bir fayda sağlamaktadır) ve çimentodaki  $C_3A$  oranının düşürülmesi şeklinde sıralanmaktadır (ACI 201.2R-08).

### 5.3.3. Klor İyonu Penetrasyonu Deney Sonuçları

“ASTM C1202-10 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardına göre, sertleşmiş beton numunesi içerisinde geçebilen elektrik yükü (Coulomb cinsinden) ve klor iyonlarının betona nüfuz edebilmesi arasındaki ilişki Tablo 5.1'de gösterildiği gibidir. Harç numunelerinin klor difüzyonu değerleri ise Şekil 5.17'de verilmiştir.

**Tablo 5.1:** Betondan geçen elektrik yükü-klor iyonu penetrasyonu ilişkisi (ASTM C1202-10).

| Elektrik Yükü (Coulomb) | Klor İyonu Penetrasyonu |
|-------------------------|-------------------------|
| > 4000                  | Yüksek                  |
| 2,000 - 4,000           | Orta                    |
| 1,000 - 2,000           | Düşük                   |
| 100 - 1,000             | Çok Düşük               |
| < 100                   | İhmal Edilebilir        |



**Şekil 5.17:** Harç numunelerinin klor difüzyonu karşılaştırması.

Şekil 5.17’de sunulan elektrik yükü değerleri ASTM C1202-10’daki yaklaşıma göre değerlendirildiğinde, referans harç numunesi için yüksek seviyede olan klor iyonu penetrasyonunun, %12 mertebesinde ÖDZ katkısı ile ‘‘orta klor geçirimli’’ ve %24 mertebesinde ÖDZ katkısı ile ise ‘‘düşük-çok düşük klor geçirimli’’ seviyelerine gerilediği görülmektedir.

Bu deneyde DZ3, DZ4 ve DZ5 kodlu DZ numunelerinin birbirine yakın performans gösterdiği sonucuna varılabilir. Tablo 4.30’da ayrıntısı verildiği üzere, taze harç silindir kalıplarına iki katman halinde yerleştirilmiş ve deneyde her bileşim için ikişer silindir numunesi hazırlanmıştır. Tabloda ‘‘alt’’ ve ‘‘üst’’ ibareleri ile tanımlı, harç silindirlerinin alt ve üst kesimlerinden kesilerek alınmış dilimler arasındaki elektrik yükü farkı, numunenin birinci ve ikinci katmanlarının kompozitesinde alt katmanın iki

defa vibrasyona tabi olmasından kaynaklanan farklılaşmaya bağlı bir ilişki göstermiştir. Daha yüksek kompasiteli (daha iyi sıkışmış) alt kesimden elde edilen silindir dilimlerinin daha düşük klor difüzyonu değerleri sergilediği görülmüştür. Silindirin alt yarısından hazırlanmış numuneler üst yarısından alınmış numunelere kıyasla %12 ÖDZ katkılı karışımlarda yaklaşık %15, %24 ÖDZ katkılı karışımlarda ise yaklaşık %20 mertebesinde daha yüksek klor difüzyonu direnci sağlamıştır. Bu fark, harcın kompasitesinin klor penetrasyonunu engelleyici etkisi bakımından dikkate değer bulunmuştur.

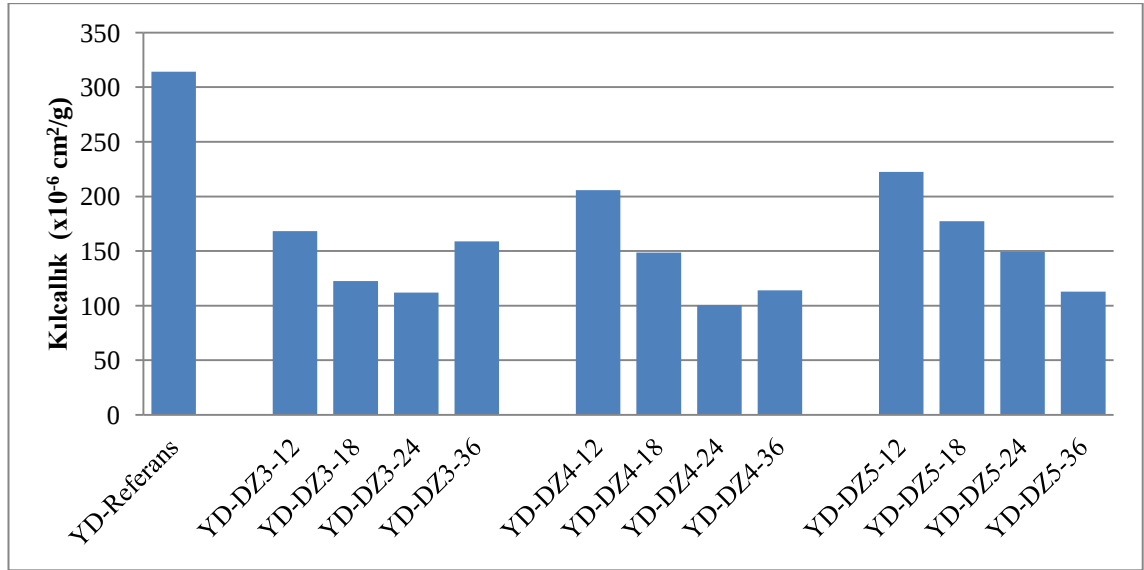
Ahmadi ve Shekarchi (2010), %10-20 mertebesinde DZ (%90-95 klinoptilolit içeren, 3200cm<sup>2</sup>/g Blaine inceliğinde) ilavesiyle klor difüzyonu katsayısında referansa kıyasla önemli bir düşüş tespit etmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler Ahmadi ve Shekarchi (2010) ile kıyaslandığında, %12 ve %24 ÖDZ katkılı harçların klor difüzyonu performansı, daha düşük klinoptilolit içeriğine karşılık daha yüksek incelik değeri sayesinde benzer sonuçlara ulaşılabildiği şeklinde yorumlanmıştır.

Klor hem betona hem de donatıya zararlı bir elementtir. Bu nedenle betonun klor içeriği ve klor iyonlarının dışarıdan betona nüfuzu önlenmelidir. Klor hasarına uğramış betonlar şişer, dayanım kaybeder ve diğer zararlı etkilere (sülfat, don gibi) hassasiyeti artar. Daha düşük Cl<sup>-</sup> difüzyonu ve çok düşük portlandit içeriği nedeniyle puzolanik çimentolu betonların klor hasarına hassasiyeti daha düşüktür (Hewlett, 2008).

Klor etkisi, beton içerisindeki donatıların korozyonuna sebep olması nedeniyle betonun maruz kaldığı diğer olumsuz şartlardan farklılık gösterir. Esas olarak klor etkisi altında betonun bozunması, yalnızca donatının korozyona uğramasıyla hacminin genişlemesine bağlı olarak, donatıyı çevreleyen betonda çatlaklar oluşmasıdır. Korozyon, donatının etrafında çimento hidratasyonunun başlamasından hemen sonra kendiliğinden oluşan ve korozyonu önleyen pasif katmanın, betona giren klorun etkisi altında parçalanmasıyla başlamaktadır. Aynı şartlar altında Portland çimentolu harcın, tras katkılı çimento harcına kıyasla 5 kat daha fazla klor giriş derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Diğer yandan, betona klor girişi ile ilgili olarak genel düşünce, betonun S/Ç oranının ve dolayısıyla sıkılığının (kompasitesinin) kullanılan puzolandan çok daha önemli olduğudur (Erdoğan ve diğ., 2011).

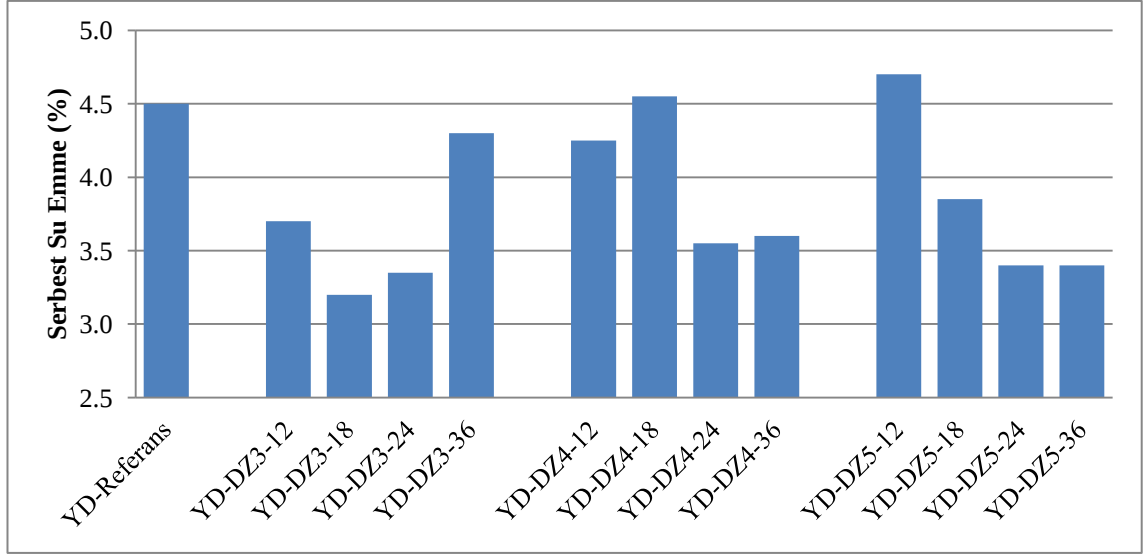
### 5.3.4. Kılcal ve Serbest Su Emme Deney Sonuçları

Yüksek dozlu serideki harç prizmalarının kılcallığı Şekil 5.18’de verilmiştir. Bu serinin kılcallık değerleri incelendiğinde, ÖDZ katkılı harçlarda, özellikle katkı dozunun artması ile kılcallıkta referansa kıyasla önemli bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. DZ3 ve DZ4 kodlu numunelerde, katkı miktarı başlangıç seviyesi olan %12’den %18 ve sonra %24’e yükseldiğinde düşüş gösteren kılcallık değerinin %36 katkılı prizmalarda yüksek çıkması, yukarıda da bahsedildiği üzere, yüksek oranda ÖDZ içeren harçlardaki kıvam kaybı ve dolaylı olarak da porozite artışı ile ilişkilendirilmiştir. Buna karşılık, DZ5 kodlu numunenin diğer iki DZ numunesine kıyasla daha düşük su ihtiyacı (Tablo 4.12), DZ3 ve DZ4 kodlu harçlarınkinden daha yüksek kıvam elde edilmesine ve %36 katkılı prizmalarda bile, kılcallıkta ÖDZ katkısı artışına bağlı gerilemenin açık bir şekilde gözlemlenebilmesine imkan tanımıştır.



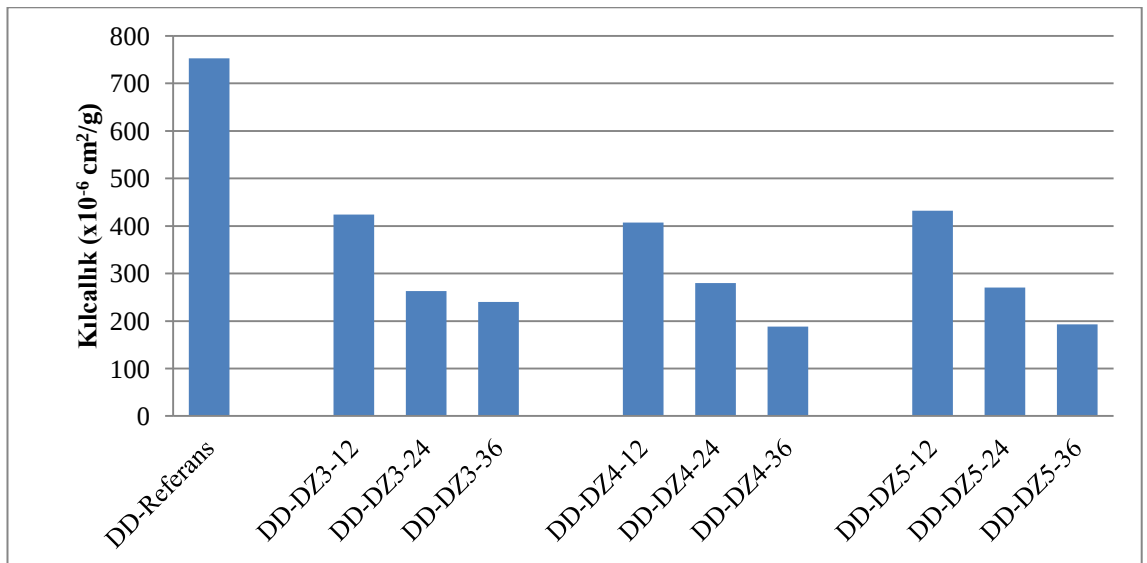
Şekil 5.18: Yüksek dozlu serideki harçlarda kılcallık karşılaştırması.

Yüksek dozlu serideki harç prizmalarının serbest su emmesi Şekil 5.19’da verilmiştir. Bu serinin serbest su emme değerleri incelendiğinde, %12 oranında ÖDZ katkılı DZ3 ve DZ4 harçlarında referansa kıyasla serbest su emme değerinde küçük bir düşüş gözlenmekle birlikte, DZ5 numunesinin serbest su emmesi referansından yüksektir. Deney sonuçları arasında tutarsız değerler bulunmaktadır. Ancak eldeki veriler ışığında, serbest su emme değerlerinde %18 ve üzerinde ikame ÖDZ katkısı ile düşüş elde edilebileceği görülmektedir. Yüksek dozlu serinin serbest su emme değerleri içinde en tutarlı veriler DZ5 numaralı ÖDZ katkılı harçlara ait olanlardır.



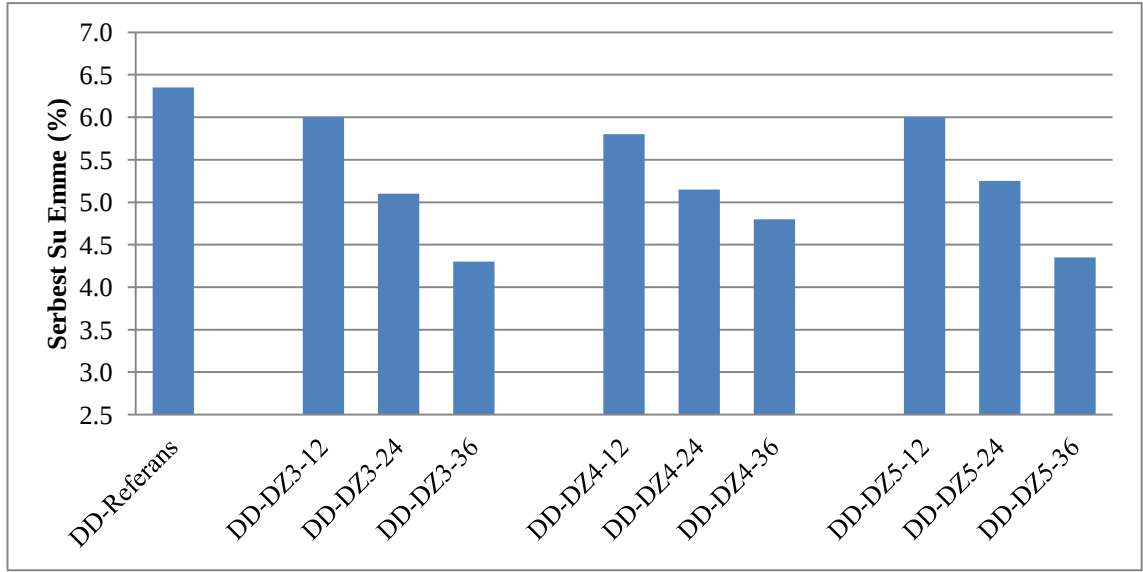
**Şekil 5.19:** Yüksek dozlu serideki harçlarda serbest su emme karşılaştırması.

Düşük dozlu serideki harç prizmalarına ait kılcallık değerlerinin ilişkisi Şekil 5.20’de verilmiştir. Bu serinin kılcallık değerleri incelendiğinde, ÖDZ katkılı harçlarda, katkı dozunun %12 ve %24 mertebesinde olduğu prizmalarda kılcallıkta referansa kıyasla önemli bir düşüş görülmektedir. Ancak, katkı miktarı %36’ya yükseldiğinde DZ5 kodlu numune dışında, kılcallıktaki düşüş daha sınırlıdır. Bu durum, aynen yüksek dozlu serideki harçlarda olduğu gibi, DZ5 kodlu numunenin diğer iki DZ numunesine kıyasla daha düşük su ihtiyacının etkisiyle DZ3 ve DZ4 kodlu harçlarınkinden daha yüksek olan kıvamı ve numunelerin kalıba daha yüksek kompasite ile yerleştirilmiş olması nedeniyle ortaya çıkmıştır.



**Şekil 5.20:** Düşük dozlu serideki harçlarda kılcallık karşılaştırması.

Düşük dozlu serideki harçlarda serbest su emme Şekil 5.21’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde, %12 ÖDZ katkısı ile DZ3 ve DZ4 kodlu harçların serbest su emmede referansa kıyasla sınırlı da olsa bir azalmaya yol açtığı görülmektedir. Buna karşılık, %24 ÖDZ katkısı ile elde edilen azalma daha dikkat çekicidir. %36 ÖDZ katkısı ile üretilen harçlarda %12 ve %24 ÖDZ katkılı harçlara kıyasla serbest su emme gerilemekle birlikte, kıvamla ilişkilendirilebilecek tutarlılıkta değerler elde edilememiştir.



**Şekil 5.21:** Düşük dozlu serideki harçlarda serbest su emme karşılaştırması.

Puzolanların çimento hamurundaki kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek betonun permeabilitesini azalttığı genel kabul gören bir konudur (Karakurt ve Topçu, 2011; Chindaprasit ve diğ., 2007; Erdoğan ve diğ., 2011). Özellikle klinoptilolit içeren zeolitlerin, reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazları sayesinde, çimento hidratasyonu sırasında oluşan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyonu C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeli ve alüminat oluşturmak suretiyle sertleşmiş betonun mikroyapısını geliştirir ve geçirimsiz hale getirir (Karakurt ve Topçu, 2011; Gervais ve Ouki, 2002).

Öğütülmüş doğal zeolitin harçta veya betonda mineral katkı olarak kullanılması yoluyla veya bileşimde puzolanik çimentolara yer vererek, kılcal yolla emilen ve yapılarda yüzey kusurlarına ve rutubet sorununa neden olan suyun getirdiği olumsuz etkiler azaltılabilir.

#### 5.4. KARIŞIMLARDA KULLANILAN BAĞLAYICININ (ÇİMENTO+ÖDZ) ÇİMENTO STANDARDI YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında üretilen harçlarda bağlayıcı olarak özellikleri Tablo 4.14'te verilen CEM I 42.5R çimentosu veya CEM I 42.5R+ÖDZ karışımı kullanılmıştır. CEM I 42.5R çimentosu ve ÖDZ gibi iki bileşenin karışmasıyla laboratuvar ortamında yeni bir bağlayıcı elde edilmiş olmaktadır. Bu yeni bağlayıcı, "TS EN 197-1 Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri" standardındaki tanıma göre (Tablo 5.2) adlandırılacak olursa, karışımdaki doğal puzolan (ÖDZ) miktarına bağlı olarak Portland Puzolanlı Çimento (CEM II/A-P veya CEM II/B-P) tipine karşılık gelmektedir (Tablo 5.3). Tablo 5.3'te verilen çimentodaki katkı oranları hesaplanırken, CEM I 42.5 çimentosu içerisinde %5 oranında minör ilave bileşen bulunduğu varsayılmıştır. Üretici raporlarında veya ürün adlamasında belirtilmesi zorunlu olmamakla birlikte, Türkiye'de hemen hemen tüm CEM I 42.5R çimentolarında TS EN 197-1'deki tanım dahilinde max %5 oranında minör ilave bileşen (çoğunlukla kalker) bulunmaktadır.

TS EN 197-1'deki tanıma göre puzolanik katkılar CEM II, CEM IV ve CEM V tip çimentoların bileşiminde yer alabilmektedir. Her üç çimento tipinde de birden fazla puzolanik katkı bir arada kullanılabilirken, CEM II tip çimentonun sadece doğal puzolan katkısı içeren bir çeşidi de bulunmaktadır. Bu tip çimento CEM II Portland-Puzolanlı Çimento adıyla anılmaktadır ve klinkere ikame olarak %6-35 aralığında doğal puzolan katkısı içerebilmektedir.

Puzolan, Portland çimentosu ve su ile karıştırıldığında klinkerdeki kalsiyum silikatlardan hidratasyon sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girer. Bu reaksiyonun sonucunda, hidratasyon ürünleri içerisindeki portlandit  $[Ca(OH)_2]$  miktarı referans Portland çimentolu karışımdakinden daima daha azdır. Portland çimentosu ve puzolanın birarada bulunması hidratasyon reaksiyonlarını değişikliğe uğratar (Hewlett, 2008).

Prensip olarak, puzolan Portland çimentosuna çimento fabrikasında veya beton santralında katılabilir. İlk durumda puzolan, klinker ve alçıtaşı ile birlikte öğütülebilir veya ayrı öğütüldükten sonra uygun ekipmanla homojen bir şekilde çimentoya ilave

edilebilir. İkinci durumda ise öğütülmüş puzolan çimento ile birlikte bir bileşen olarak beton içerisinde yer alır (puzolanın bir bileşen olarak betona ilave edilmesi yoluyla elde edilen homojenite, çimento fabrikasındaki prosesle kıyaslandığında daha düşüktür). Puzolan ilavesi dayanım ve dayanıklılık açısından beton kalitesine katkı sağlar (Hewlett, 2008).

**Tablo 5.2:** TS EN 197-1/2002'ye göre genel çimentolar grubuna ait 27 ürün.

| Ana Tipler | 27 ürüne ait işaret<br><br>(Genel Çimento Tipleri) |             | Bileşim (kütlege <sup>a)</sup> % olarak) |                     |                 |         |                         |           |            |             |        |       |        | Minör ilave Bileşen |
|------------|----------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------|---------------------|-----------------|---------|-------------------------|-----------|------------|-------------|--------|-------|--------|---------------------|
|            |                                                    |             | Ana Bileşenler                           |                     |                 |         |                         |           |            |             |        |       |        |                     |
|            |                                                    |             | Klinker                                  | Yüksek Fırın Curufu | Silis Dumanı    | Puzolan |                         | Uçucu Kül |            | Pişmiş Şist | Kalker |       |        |                     |
|            |                                                    |             | K                                        | S                   | D <sup>b)</sup> | Doğal P | Doğal Kalsine Edilmiş Q | Silissi V | Kalkersi W | T           | L      | LL    |        |                     |
| CEM I      | Portland Çimento                                   | CEM I       | 95-100                                   | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
| CEM II     | Portland-Curuflu Çimento                           | CEM II/A-S  | 80-94                                    | 6-20                | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-S  | 65-79                                    | 21-35               | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            | Portland-Silis Dumanlı Çimento                     | CEM II/A-D  | 90-94                                    | -                   | 6 - 10          | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            | Portland-Puzolanlı Çimento                         | CEM II/A-P  | 80-94                                    | -                   | -               | 6 - 20  | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-P  | 65-79                                    | -                   | -               | 21- 35  | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/A-Q  | 80-94                                    | -                   | -               | -       | 6-20                    | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-Q  | 65-79                                    | -                   | -               | -       | 21-35                   | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            | Portland-Uçucu Küllü Çimento                       | CEM II/A-V  | 80-94                                    | -                   | -               | -       | -                       | 6 - 20    | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-V  | 65-79                                    | -                   | -               | -       | -                       | 21-35     | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/A-W  | 80-94                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | 6-20       | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-W  | 65-79                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | 21-35      | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            | Portland-Pişmiş Şistli Çimento                     | CEM II/A-T  | 80-94                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | 6-20        | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-T  | 65-79                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | 21-35       | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            | Portland-Kalkerli Çimento                          | CEM II/A-L  | 80-94                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | 6-20  | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-L  | 65-79                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | 21-35 | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/A-LL | 80-94                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | 6-20   | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-LL | 65-79                                    | -                   | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | 21 -35 | 0-5                 |
|            | Portland-Kompoze Çimento <sup>c)</sup>             | CEM II/A-M  | 80-94                                    | 6 – 20              |                 |         |                         |           |            |             |        |       |        | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM II/B-M  | 65-79                                    | 21 - 35             |                 |         |                         |           |            |             |        |       |        | 0-5                 |
| CEM III    | Yüksek fırın Curuflu Çimento                       | CEM III/A   | 35-64                                    | 36-65               | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM III/B   | 20-34                                    | 66-80               | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
|            |                                                    | CEM III/C   | 5-19                                     | 81-95               | -               | -       | -                       | -         | -          | -           | -      | -     | -      | 0-5                 |
| CEM IV     | Puzolanik Çimento <sup>c)</sup>                    | CEM IV/A    | 65-89                                    | -                   | 11 - 35         |         |                         |           |            | -           | -      | -     | 0-5    |                     |
|            |                                                    | CEM IV/B    | 45-64                                    | -                   | 36 - 55         |         |                         |           |            | -           | -      | -     | 0-5    |                     |
| CEM V      | Kompoze Çimento <sup>c)</sup>                      | CEM V/A     | 40-64                                    | 18-30               | -               | 18 - 30 |                         |           | -          | -           | -      | -     | 0-5    |                     |
|            |                                                    | CEM V/B     | 20-38                                    | 31-50               | -               | 31 - 50 |                         |           | -          | -           | -      | -     | 0-5    |                     |

a Çizelgedeki değerler ana ve minör ilâve bileşenlerin toplamı ile ilgilidir.

b Silis dumanının oranı % 10'la sınırlanmıştır.

c Portland Kompoze çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanik Çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompoze Çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin yanındaki diğer ana bileşenler çimentova ait işarette beyan edilmelidir ( Madde 8).

**Tablo 5.3:** TS EN 197-1 standardına göre harç karışımlarındaki CEM I+Doğal Puzolan (ÖDZ) karışımına karşılık gelen çimento tipi.

| Karışımdaki ÖDZ<br>Miktarı<br>(%) | EN 197-1 Hesap<br>Yöntemiyle Çimentoda<br>Katkı Miktarı<br>(%) | TS EN 197-1<br>Adlamasına Göre<br>Çimento Tipi |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 12                                | 16,9                                                           | CEM II/A-P                                     |
| 18                                | 21,8                                                           | CEM II/B-P                                     |
| 24                                | 26,1                                                           |                                                |
| 36                                | 33,5                                                           |                                                |

Portland çimentosuna ikame puzolan katkısı çimentonun sertleşme sürecini başlangıçta yavaşlatırken (erken dayanımları düşürürken), ileri yaşlarda durum tersine döner ve puzolan katkılı çimentolar referansınkine eş değer veya üzerinde bir dayanım performansı sunar (Hewlett, 2008). Bu çalışma kapsamında elde edilen destekleyici bulgular Bölüm 5.2.1 ve Bölüm 5.2.2’de verilmiştir.

“BS EN 197-1:2011 Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements” standardının bilgi mahiyetindeki Annex A kısmında, EN 197-1 kapsamındaki genel çimentolar tanımı içerisinde bulunmakla birlikte sülfata dayanıklı çimento kabul edilmeyen ancak CEN (Comité Européen de Normalisation) üyesi ülkelerin kendi ulusal standartlarıncı sülfata dayanıklı çimento olarak adlandırılan ürünlerin bir tablosu sunulmaktadır (Tablo 5.4).

Tablo 5.4’te görüldüğü gibi, EN 197-1 kapsamındaki çimentolardan yüksek fırın cürufu, uçucu kül, doğal puzolan, mikro silis, pişmiş şist ve kalker gibi mineral katkıları içeren geniş bir ürün yelpazesi, CEN üyesi ülkelerde sülfata dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir (söz konusu ülkelerin ulusal standartlarında, yapının maruz kaldığı zararlı etkinin derecesine göre betonda minimum çimento dozu, maksimum S/Ç oranı, minimum dayanım gibi ilave sınırlamalar da olabileceği unutulmamalıdır). Bu çalışma kapsamında, ÖDZ ve CEM I 42.5R çimentosunun karıştırılmasıyla elde edilen ve EN 197-1’deki tarife göre CEM II/A-P veya CEM II/B-P olarak adlandırılabilir bağlayıcı da Fransa, İtalya, Portekiz ve İspanya tarafından sülfata dayanıklılık gerektiren uygulamalara uygun görülmektedir (Tablo 5.4).

**Tablo 5.4:** CEN üyesi ülkelerin ulusal standartları tarafından sülfata dayanıklı çimento olarak kabul gören, EN 197-1: 2011'e uygun çimentolar.

| CEN Üyesi Ülke          | Ulusal Standart                 | CEM Çimento Tipi                                                                                                                                                                        |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Avusturya</b>        | ÖNORM B 3327-1<br>ÖNORM B4710-1 | II/A-S, II/B-S, II/A-V, II/B-V,<br>II/A-M, II/B-M, II/A-D, III/A                                                                                                                        |
| <b>Belçika</b>          | NBN B12-108                     | V/A (S-V)                                                                                                                                                                               |
| <b>Danimarka</b>        | DS/INF 135                      | I<br>II/A-V, II/B-V                                                                                                                                                                     |
| <b>Fransa</b>           | NF P 15-319                     | II/A-S, II/B-S, II/A-V, II/A-P,<br>II/A-M (S-V)<br>III/A<br>V/A, V/B                                                                                                                    |
| <b>Macaristan</b>       | MSZ 4737-1                      | II/A-V                                                                                                                                                                                  |
| <b>İtalya</b>           | UNI 9156                        | II/A-S, II/B-S, II/A-D, II/A-P,<br>II/A-V, II/A-L, II/A-LL, II/B-L,<br>II/B-LL, II/A-M, II/A-W, II/A-T,<br>II/B-P, II/B-V, II/B-W, II/B-T,<br>II/B-M<br>III/A<br>IV/A, IV/B<br>V/A, V/B |
| <b>Polonya</b>          | PN-B-19707                      | II/B-V<br>III/A<br>V/A, V/B                                                                                                                                                             |
| <b>Portekiz</b>         | NP EN 206-1                     | II/A-L, II/A-LL, II/A-M, II/A-S,<br>II/B-S, II/A-D, II/A-P, II/B-P,<br>II/A-V, II/B-V<br>III/A<br>IV/A, IV/B<br>V/A, V/B                                                                |
| <b>İspanya</b>          | UNE 80303-1                     | II/A-S, II/B-S, II/A-D, II/A-P,<br>II/B-P, II/A-V, II/B-V<br>III/A<br>V/A                                                                                                               |
| <b>İsviçre</b>          | SN EN 206-1                     | II/A-D, II/B-M (D, V, S, T, LL)<br>II/B-V                                                                                                                                               |
| <b>Birleşik Krallık</b> | BS 8500                         | III/A<br>IV/A (V), IV/B (V)                                                                                                                                                             |

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) 2014 yılı verilerine göre, ülkemizde üretilen Portland puzolanlı çimentoların (CEM II/A-P ve CEM II/B-P) iç satıştaki payı Tablo 5.5'te verilmiştir. Tablo 5.5'teki değerler incelendiğinde Portland puzolanlı çimentoların yurt içi tüketiminin düşüklüğü dikkati çekmektedir. Çimento endüstrisi ürün yelpazesini belirlerken hammadde temini de dahil olmak üzere üretim maliyeti,

üründe elde edilen (ve uygulamanın hizmetine sunulan) özellikler ve pazarın talepleri gibi unsurları dikkate almaktadır. Doğal puzolanların, çimentonun kıvam suyunu dikkate değer ölçüde artırma karakteri de endüstrinin mineral katkı olarak bu hammaddeye yönelimini sınırlandırmaktadır.

**Tablo 5.5:** Portland puzolanlı çimentoların iç satışıdaki payı (www.tcmb.gov.tr).

| Yıllar | Portland Puzolanlı<br>Çimentonun İç<br>Satıştaki Payı<br>(%) |
|--------|--------------------------------------------------------------|
| 2009   | 2,61                                                         |
| 2010   | 3,68                                                         |
| 2011   | 2,90                                                         |
| 2012   | 1,43                                                         |
| 2013   | 0,43                                                         |

Yukarıda belirtildiği gibi, TS EN 197-1'deki tanıma göre doğal puzolanlar CEM II dışında CEM IV ve CEM V tipi çimentoların bileşiminde de yer alabilmektedir. Dolayısıyla ülkemiz çimento endüstrisinin doğal puzolan kullanımı, Tablo 5.5'te sunulan değerlerle hesaplanabilecek mertebeden daha yüksektir.

Öte yandan, mineral katkı olarak betona uçucu kül, silis dumanı (mikro silis) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu katılabilmesine yönelik şartları tarif eden ‘‘TS EN 206 Şubat 2014 Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk’’ isimli standardın kapsamında doğal puzolanlar yer almamaktadır.

## 5.5. ÖDZ KATKISININ HARÇ ÖZELİKLERİNE ETKİSİNİN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Çimentoya değişik oranlarda ikame edilerek harç bileşimine dahil olan ÖDZ katkısının harcın çeşitli parametrelerdeki performansı üzerindeki etkileri yukarıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Yüksek ve düşük dozlu harç serilerinde ÖDZ katkısı içermeyen referans

karışımın performansı referans alınmak kaydıyla, farklı oranlardaki ÖDZ katkısından kaynaklanan rölatif performans değişimi Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de verilmiştir.

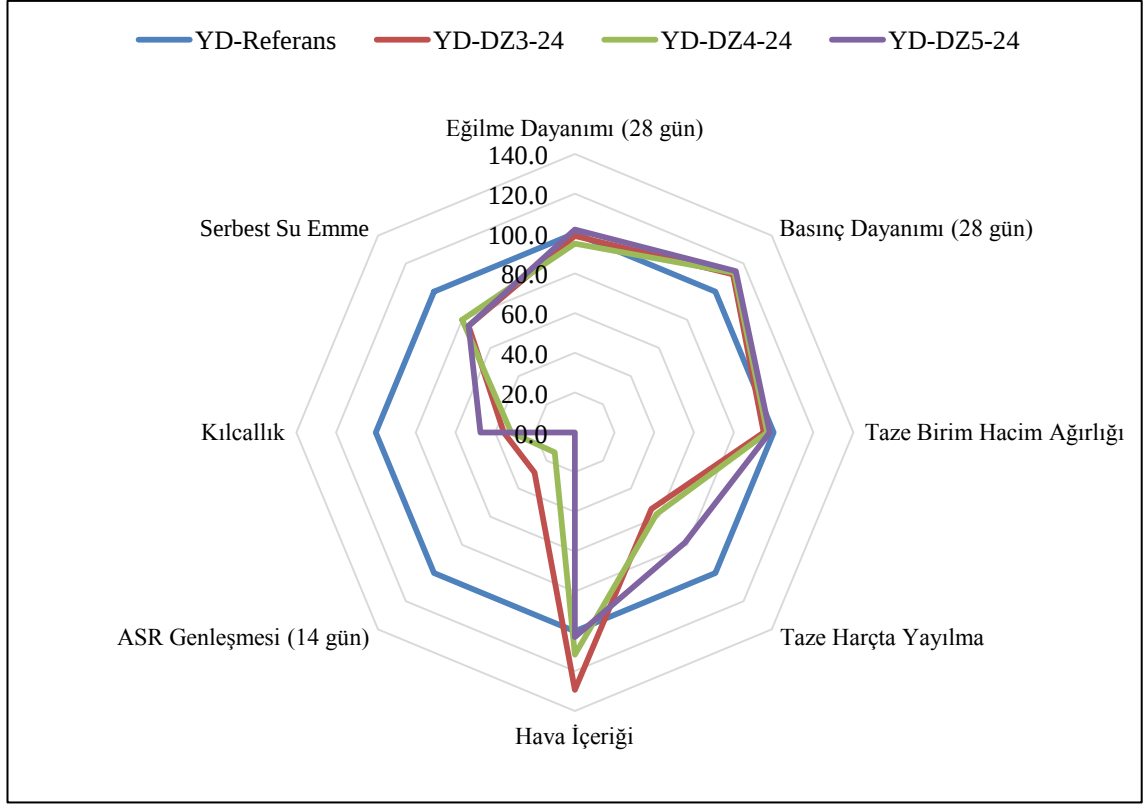
Çimentoya %24 oranında ikame edilen ÖDZ katkısının, yüksek ve düşük dozlu harç bileşiminde harcın taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini referans harca kıyasla ne ölçüde değiştirdiğini toplu halde gösteren diyagramlar sırasıyla Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de sunulmuştur. %24 oranında ÖDZ katkısı, deneylerde kullanılan DZ numunelerinin üçüyle de, bir yandan basınç dayanımlarını iyileştirirken öte yandan harcın durabilite performansına da kayda değer katkı sağlamıştır. Taze harcın yayılmasındaki gerileme ise (kimyasal katkı teknolojisiyle telafi edilmesi mümkün) genel performans değerlendirmesi içerisindeki yegane olumsuzluktur.

**Tablo 5.6:** Harçların rölatif performans özeti (YD serisi).

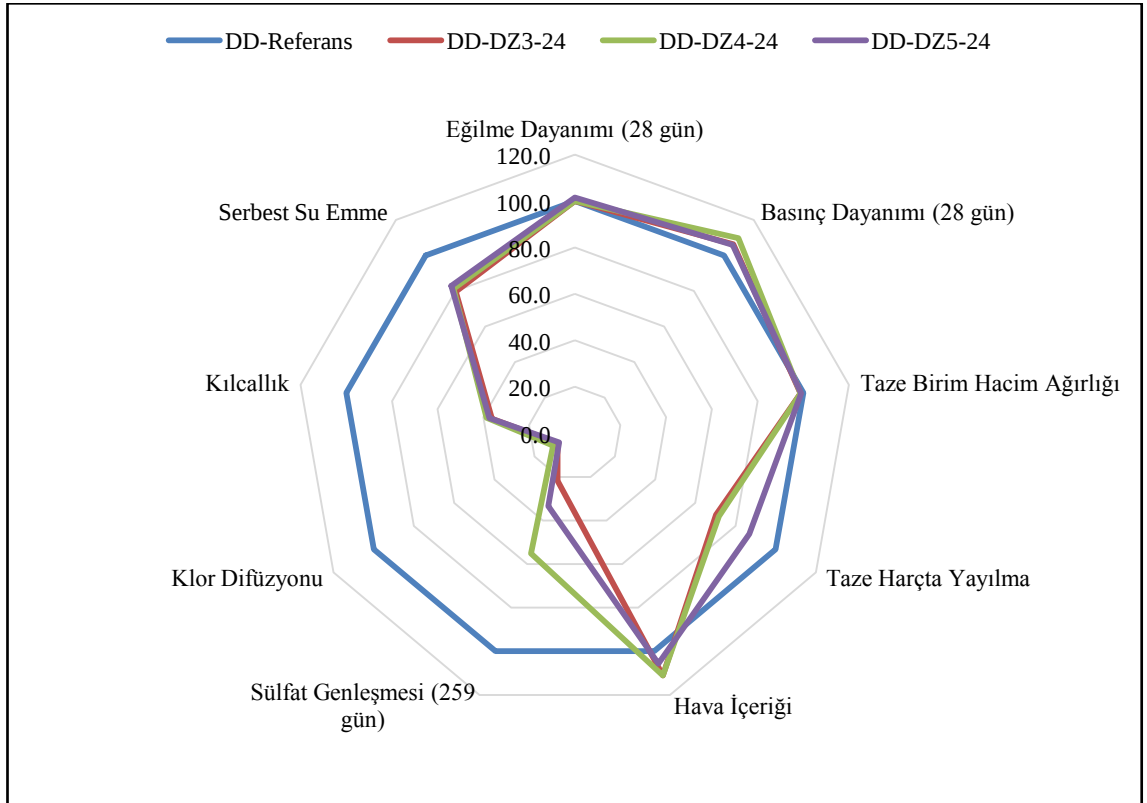
|                                      |                             | YD<br>Referans | YD<br>DZ3-12 | YD<br>DZ3-18 | YD<br>DZ3-24 | YD<br>DZ3-36 | YD<br>DZ4-12 | YD<br>DZ4-18 | YD<br>DZ4-24 | YD<br>DZ4-36 | YD<br>DZ5-12 | YD-<br>DZ5-18 | YD-<br>DZ5-24   | YD-<br>DZ5-36   |
|--------------------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|
| <b>Eğilme Dayanımı<br/>(28 gün)</b>  | MPa                         | 100,0          | 94,2         | 98,7         | 98,7         | 81,4         | 95,5         | 88,5         | 94,9         | 87,8         | 98,1         | 98,1          | 101,9           | 111,5           |
| <b>Basınç Dayanımı<br/>(28 gün)</b>  | MPa                         | 100,0          | 100,6        | 103,5        | 112,4        | 95,4         | 99,2         | 104,1        | 113,5        | 105,0        | 99,6         | 104,6         | 114,6           | 121,6           |
| <b>Taze Birim Hacim<br/>Ağırlığı</b> | kg/m <sup>3</sup>           | 100,0          | 97,2         | 97,2         | 95,0         | 81,7         | 98,4         | 97,5         | 96,8         | 87,2         | 98,8         | 97,9          | 98,0            | 97,6            |
| <b>Taze Harçta<br/>Yayılma</b>       | cm                          | 100,0          | 77,9         | 66,7         | 54,5         | 49,5         | 77,5         | 69,4         | 58,1         | 45,0         | 89,6         | 86,5          | 78,4            | 66,7            |
| <b>Hava İçeriği</b>                  | %                           | 100,0          | 117,6        | 120,6        | 129,4        | 426,5        | 102,9        | 117,6        | 111,8        | 323,5        | 94,1         | 88,2          | 102,9           | 111,8           |
| <b>ASR Genleşmesi<br/>(14 gün)</b>   | %                           | 100,0          | 35,7         | -            | 28,6         | 21,4         | 28,6         | -            | 14,3         | 21,4         | 21,4         | -             | Genleşme<br>yok | Genleşme<br>yok |
| <b>Kılcallık</b>                     | x10-6<br>cm <sup>2</sup> /g | 100,0          | 53,5         | 39,0         | 35,6         | 50,6         | 65,4         | 47,3         | 31,9         | 36,3         | 70,8         | 56,4          | 47,4            | 35,9            |
| <b>Serbest Su Emme</b>               | %                           | 100,0          | 82,2         | 71,1         | 75,6         | 95,6         | 95,6         | 102,2        | 80,0         | 80,0         | 104,4        | 86,7          | 75,6            | 75,6            |

**Tablo 5.7:** Harçların rölatif performans özeti (DD serisi).

|                                        |                             | <b>DD<br/>Referans</b> | <b>DD<br/>DZ3-12</b> | <b>DD<br/>DZ3-24</b> | <b>DD<br/>DZ3-36</b> | <b>DD<br/>DZ4-12</b> | <b>DD<br/>DZ4-24</b> | <b>DD<br/>DZ4-36</b> | <b>DD<br/>DZ5-12</b> | <b>DD<br/>DZ5-24</b> | <b>DD<br/>DZ5-36</b> |
|----------------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Eğilme Dayanımı<br/>(28 gün)</b>    | MPa                         | 100,0                  | 100,8                | 100,0                | 97,7                 | 90,7                 | 100,0                | 96,1                 | 96,9                 | 101,6                | 110,1                |
| <b>Basınç Dayanımı<br/>(28 gün)</b>    | MPa                         | 100,0                  | 101,2                | 106,3                | 116,2                | 95,7                 | 109,7                | 116,7                | 99,9                 | 106,0                | 119,6                |
| <b>Taze Birim Hacim<br/>Ağırlığı</b>   | kg/m <sup>3</sup>           | 100,0                  | 99,1                 | 98,8                 | 94,7                 | 99,4                 | 98,8                 | 97,1                 | 99,9                 | 99,1                 | 98,9                 |
| <b>Taze Harçta<br/>Yayılma</b>         | cm                          | 100,0                  | 83,5                 | 70,3                 | 56,6                 | 82,5                 | 71,7                 | 57,1                 | 92,3                 | 86,8                 | 79,2                 |
| <b>Hava İçeriği</b>                    | %                           | 100,0                  | 111,1                | 111,1                | 144,4                | 116,7                | 111,1                | 111,1                | 100,0                | 105,6                | 105,6                |
| <b>Sülfat Genleşmesi<br/>(259 gün)</b> | %                           | 100,0                  | 83,3                 | 21,8                 | -                    | 98,3                 | 55,2                 | -                    | 133,1                | 33,5                 | -                    |
| <b>Klor Difüzyonu</b>                  | Coulom<br>b                 | 100,0                  | 17,5                 | 8,5                  | -                    | 21,2                 | 10,7                 | -                    | 18,4                 | 7,8                  | -                    |
| <b>Kılcallık</b>                       | x10-6<br>cm <sup>2</sup> /g | 100,0                  | 58,4                 | 36,3                 | 33,0                 | 56,1                 | 38,6                 | 25,9                 | 59,5                 | 37,3                 | 26,6                 |
| <b>Serbest Su Emme</b>                 | %                           | 100,0                  | 93,8                 | 79,7                 | 67,2                 | 90,6                 | 81,3                 | 75,0                 | 93,8                 | 82,8                 | 68,8                 |



Şekil 5.22: Yüksek dozlu harçların genel rölatif performansı.



Şekil 5.23: Düşük dozlu harçların genel rölatif performansı.

## 5.6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden alınan doğal zeolit numunelerinin karakterizasyonu yapılmış ve öğütülmüş halde mineral katkı olarak çimento harcına katıldıklarında elde edilen üstünlükler nedenleri ile ortaya koyulmuştur. Çalışmada ulaşılan önemli sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Türkiye'nin dört ayrı bölgesinden (Göğdes-Manisa, Bigadiç-Balıkesir, Karamürsel-Yalova, Kozaklı-Nevşehir) temin edilerek karakterizasyonu yapılan dokuz numune içerisinde, doğal zeolitin harçta (veya betonda) mineral katkı olarak kullanılması durumundaki faydasını büyük oranda etkileyen zeolit minerali klinoptilolit oranı %12,3-55,8 aralığındadır. Ayrıca numunelerin bileşiminde yaygın olarak kuvars, feldspat ile az miktarda illit ve montmorillonit mineralleri bulunmaktadır. Bazı numunelerde riversideit minerali de görülmüştür.
- Doğal zeolit numuneleri içerisindeki klinoptilolit miktarı geniş bir aralıkta bulunmakla birlikte, numunelerin reaktif silis oranı ve puzolanik aktiviteleri birbirine daha yakındır.
- Karamürsel (Yalova) doğal zeoliti dışındaki sekiz numune tane yoğunluğu ve ağırlıkça su emme değerleri bakımından birbirine daha yakın karakterdedir.
- Doğal zeolit numunelerinin eş değer 45µm elek bakiyesi ile verdikleri Blaine ve BET değerleri arasında tutarlı bir ilişki bulunmamaktadır. Çimento veya beton uygulamaları sırasında dikkate alınan Blaine yöntemiyle tayin edilmiş özgül yüzey ölçümlerinin zeolitik hammaddelerde incelik takibi için etkin bir yol olamayacağı anlaşılmaktadır.
- İncelenen dokuz numune için Blaine veya BET değerleri ile kıvam suyu arasındaki ilişki oldukça tutarsızdır. Dolayısıyla zeolitik hammaddelerin çimento veya beton katkısı olarak kullanılmaları durumunda, taze beton kıvamı üzerindeki etkilerinin kestirilebilmesi için birden fazla parametrenin ve biriktirilmiş verilerin takibine dayalı bir yol izlenmesi gerektiği görülmektedir. Ancak yine de en sağlıklı veri doğal zeolit katkısının (veya zeolit katkılı çimentonun) harçta veya betonda bire bir denenmesi ile elde edilebilir.

- İncelenen ÖDZ numunelerinin çimentoya ikame edildiklerinde priz başı üzerindeki etkilerinin net olarak ortaya çıkmadığı, ancak katkı oranına bağlı olarak priz sonunda gecikmeye yol açabilecekleri görülmüştür.
- Sabit S/Ç oranlı ÖDZ katkılı harçların yayılma değerleri referans harca kıyasla gerileme göstermektedir. Artan ÖDZ katkısı ile harçların kıvamı koyulaşmakta ve çok kuru kıvamlı karışımlar elde edilebilmektedir. Bu durum, ÖDZ katkılı harçların kıvamının düzenlenebilmesi için saha uygulamalarında akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanarak dengelenebilir. Ancak, kimyasal katkı kullanıldığında ilave maliyetlerle karşılaşılacağı dikkate alınmalıdır.
- Ögütülmüş doğal zeolit katkılı harçlarda referans harca kıyasla taze birim hacim ağırlığında %1-5 civarında düşüş gözlenmiştir.
- Harç kıvamı eş değer olduğunda ÖDZ katkılı harçlarla referans harç arasında taze harcın hava içeriği bakımından önemli bir fark görülmemektedir.
- Genel olarak harç karışımlarının 2 ve 7 günde eğilme ve basınç dayanımları referansının gerisinde kalmaktadır. Buna karşılık, bir miktar işlenebilirlik kaybı görülmesine rağmen, 28 ve 56 günde referansinkine eş değer veya üzerinde (artışın mertebesi karışımın çimento dozu ve porozitesine bağlı) basınç dayanımı performansı gözlenmiştir. Yüksek dozlu harç serisinde 28 günde ve düşük dozlu seride ise 56 günde daha yüksek basınç dayanımı avantajı elde edilmiştir. Kıvamın akışkanlaştırıcı katkıları kullanarak dengelenmesi yoluyla, %36 ve üzerinde ÖDZ ilavesiyle de özellikle 28 gün ve sonrasında yüksek dayanım artışı beklenebilir.
- %12 oranında ÖDZ katkısı, harçta ASR gelişimi nedeniyle ortaya çıkan genleşmeyi referansının üçte birinin altına düşürmektedir.
- %24 oranında ÖDZ katkısı ile hazırlanan harçların sülfat hasarı nedeniyle genleşmesinde önemli oranda gerileme elde edilmiştir.
- Klor iyonlarının ÖDZ katkılı harçlara nüfuzu, referansa kıyasla %12 katkılı karışımlarda beşte bir ve %24 katkılı karışımlarda onda bir seviyesine gerilemektedir.

- Bileşimindeki ÖDZ katkı oranı arttıkça harçtaki kılcallığın gerileme sergilediği görülmektedir. Harçta veya betonda katkı olarak kullanılan ÖDZ sayesinde, yapılarda kılcal yolla emilen ve hem yüzey kusurlarına hem de rutubet sorununa neden olan suyun getirdiği olumsuz etkiler azaltılabilir.
- Yüksek ve düşük dozlu harç serilerinin serbest su emme değerleri, genel tablo itibarıyla ÖDZ katkısının artışıyla ilgili olarak gerileme eğilimi göstermiştir.
- Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harç ve beton bileşimleri sayesinde, hem uygulamanın farklı ortam koşullarına karşı durabilitesi hem de atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı bakımından dikkate değer üstünlükler elde edilmesi mümkündür.
- Bu çalışmada ulaşılan sonuçlar, karakterizasyonu yapılan numunelerin kaynağı, mineralojik bileşimi, inceliği, harç formüllerindeki ikame oranı ve harçların bileşimi ile sınırlıdır. Farklı koşulların farklı sonuçlara yol açabileceği dikkate alınmalıdır.

## 5.7. ÖNERİLER

Zaman, kaynak ve imkan sınırlamaları nedeniyle bu çalışmanın kapsamı içerisine dahil edilemeyen ancak incelenmesinde yarar görülen konu başlıkları aşağıda sıralanmıştır:

- Türkiye’de bulunan, çalışmaya dahil edilememiş diğer zeolit sahalarından alınacak numunelerin incelenmesi ve karakterizasyonunun yapılması,
- Türkiye’deki doğal zeolit kaynaklarının iyon değişimi karakterinin ortaya koyulması,
- Farklı incelik mertebelerinde öğütülmüş doğal zeolitlerin çimentoya farklı oranlarda ikame edilmesi yoluyla, uygulamada eşdeğer faydayı sağlayan hammadde ve öğütme maliyeti toplamı için optimal noktanın belirlenmesi,
- Bu çalışmada ikame edilen miktarın üzerinde (>%36) ÖDZ katkısı ile değişik özellikler (harç ve beton) için optimum sınırın araştırılması,

- Doğal zeolitın klinker ve alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi yoluyla elde edilecek katkılı çimentonun harç ve betondaki performansının incelenmesi ve ÖDZ katkılı bileşimlerin performansı ile kıyaslanması,
- Doğal zeolit ve durabilite üzerinde etkili diğer mineral katkılarla (uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve mikrosilis) harç ve betonda performans kıyaslaması,
- Doğal zeolit ve diğer mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve mikrosilis) ikili veya üçlü karışımlar halinde çimentoya ikame ederek harç ve betonda performans kıyaslaması,
- Öğütülmüş doğal zeolit katkılı harç ve betonlarının kıvamının artırılmasında kimyasal katkı türlerinin etkinliğinin araştırılması,
- Çalışma bulgularının taze ve sertleşmiş beton ölçeğinde irdelenmesi.

## KAYNAKLAR

- ACI 201.2R-08, 2008, Guide to durable concrete, American Concrete Institute.
- AHMADI, B., SHEKARCHI, M., 2010, Use of natural zeolite as supplementary cementitious material, *Cement & concrete composites*, Elsevier, Vol. 32, 134-141.
- AKARTUNA, M., 1968, *Armutlu yarımadasının jeolojisi*, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografi, 20, 120.
- AKMAN, S., 2000, Effects of the content and kind of soluble alkalis in cements on different properties of concrete, *Cement and concrete technology in the 2000s, Second international symposium*, Istanbul, p103-116.
- ALTINLI, İ. E., 1986, *Yerbilimleri sözlüğü*, MTA yayın no 195, Ankara, 1175s.
- ASTM C150/C150M – 12, Standard Specification for Portland Cement.
- ASTM C230-08, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- ASTM C289-03, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).
- ASTM C1012–09, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.
- ASTM C1202-10, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- ASTM C1260-07, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).
- ASTM C1556-03, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion.
- ASTM C1567-08, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method).
- BARGU, S. ve SAKINÇ, M., 1987, Armutlu yarımadasında Kretase-Paleosen ilişkisi, *Türkiye jeoloji bülteni* ,30, 41-48.
- BARGU, S. ve SAKINÇ, M., 1989/1990, İzmit Körfezi ile İznik Gölü arasında kalan bölgenin jeolojisi ve yapısal özellikleri, *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yerbilimleri dergisi*, 6/1-2, 45-76.

- BISH, D. L., MING, D. W., 2001, Reviews in mineralogy & geochemistry, vol. 45, Natural zeolites: Occurrence, properties, applications, Mineralogical Society of America, Washington, 654p.
- BOZKURT, E., PARK, R. G., 1994, Southern Menderes Massif—an incipient metamorphic core complex in Western Anatolia, Turkey, *Journal of the geological society* 151, 213–216.
- BOZKURT, E., OBERHANSKI, R., 2001, Menderes Massif (Western Turkey): Structural, metamorphic and magmatic evolution—a synthesis, *International journal of earth science* 89, 679–708.
- BRECK, W. L., 1974, *Zeolite Molecular Sieves*, John Wiley & Sons Inc., 761p.
- BS EN 197-1/2000, Cement: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
- BS EN 197-1/2011, Cement: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
- BS EN 206-1/2000, Concrete: Specification, performance, production and conformity.
- BS EN 480-5/2005, Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 5: Determination of capillary absorption.
- BS EN 933-1/1997, Tests for geometrical properties of aggregates Part 1. Determination of particle size distribution - Sieving method.
- CANDAN, O. ve DORA, O. Ö., 1998, Menderes Masifi'nde granülit, eklojit ve mavi şist kalıntıları: Pan-Afrikan ve Tersiyer metamorfik evrimine bir yaklaşım, *Türkiye Jeoloji Kurumu bülteni*, c. 41/1, 1-35s.
- CANDAN, O., DORA, O. O., OBERHANSKI, R., CETINKAPLAN, M., PARTZSCH, J. H., WARKUS, F. C., DURR, S., 2001, Pan-African high-pressure metamorphism in the Precambrian basement of the Menderes Massif, Western Anatolia, Turkey, *International journal of earth sciences* 89, 793–811.
- CHINDAPRASART, P., KANCHANDA, P., SATHONSAOWAPHAK, A., CAO, H. T. 2007, Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash, *Constructuon and building materials*, 21: 1356-61.
- CRONSTEDT, A., 1756, Akad. Handl. Stockholm, 18:120, Mineral, Stockholm.
- ÇAKIR Ö. A., ÇOPUROĞLU O., RAMYAR K., 2008, Mineral katkıların incelik ve ikame oranının ASR genleşmelerine etkisi, *TCMB dergisi*, sayı 71, Ocak/Şubat 2008.
- DORA, O. O., CANDAN, O., KAYA, O., KORALAY, E. and DURR, S., 2001, Revision of “Leptitegneisses” in the Menderes Massif: a supracrustal metasedimentary origin, *International journal of earth sciences*, 89, 836-851.

- DORA, O. O., CANDAN, O., OBERHANSKI, R., and DURR, S., 1995, New evidence on the geotectonic evolution of the Menderes Massif In: Pişkin, O., Ergün, M., Savaşın, M. Y. and Tarcan, G. (eds), *Proceedings of international earth sciences colloquium on the Aegean region*, İzmir 1, 53-72.
- ERCAN, T., 1983, Batı Anadolu'daki Senozoyik yaşlı volkanik kayalar ve plaka tektoniği açısından kökensel yorumları, MTA Derleme No: 7294, 135s., Ankara (yayınlanmamış).
- ERDOĞAN, B., 1990, İzmir-Seferihisar arasındaki İzmir-Ankara zonunun stratigrafisi ve tektonik gelişimi, *Türkiye petrol jeologları derneği bülteni*, 2:1-20s., Ankara.
- ERDOĞAN, B. and GÜNGÖR, T., 2004, The problem of the core-cover boundary of the Menderes Massif and emplacement mechanism for regionally extensive gneissic granites, Western Anatolia (Turkey), *Turkish journal of earth sciences*, 13, 15-36.
- ERDOĞAN, B., ALTINER, D., GÜNGÖR, T. ve ÖZER, S., 1990, Karaburun yarımadasının stratigrafisi, *MTA dergisi* 111, Ankara, 1-23.
- ERDOĞDU, K., TOKYAY, M., TÜRKER, P., 2011, *Traslar ve traslı çimentolar*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, yayın no Y99.2, 59s, Ankara
- ERENDİL, M., GÖNCÜOĞLU, M. C., TEKELİ, O., AKSAY, A., KUŞÇU, L., ÜRGÜN, M. B., TEMREN, A. ve TUNAY, G., 1991, Armutlu yarımadasının jeolojisi, MTA Rap. No:9165 (yayınlanmamış)
- ERKUL, F., HELVACI, C., SÖZBİLİR, H. 2006, Olivine basalt and trachyandesite peperites formed at the subsurface/surface interface of a semi-arid lake: an example from the Early Miocene Bigadiç basin, western Turkey, *Journal of volcanology and geothermal research*, 149: 240-262.
- ERKUL, F., 2010, Tectonic significance of extensional ductile shear zones within the Early Miocene Alaçamdağ granites, northwestern Turkey, *Geological magazine*, 147: 611-637.
- ESENLİ, F., ÖZPEKER, I., 1993, Gördes çevresindeki Neojen havzanın zeolitik diyajenezi ve hoylandit-klinoptilolitlerin mineralojisi, *Türkiye jeoloji kurultayı bülteni*, s.8, 1-18.
- FENG, N., JIA, H., HAO, T., 1998, Effect and mechanism of natural zeolite on suppressing ASR in concrete, *Proceedings of the sixth CANMET/ACI/JCI international conference*, Bangkok, Vol. II.
- FENG, N., PENG, G., 2005, Applications of natural zeolite to construction and building materials in China, *Construction building materials*, 19(8): 579-84
- GERVAIS, C., OUKI, S. K., 2002, Performance study of cementitious systems containing zeolite and silica fume: effects of four metal nitrates on the setting time, strength and leaching characteristics, *J. Hazard Mater.*, 93: 187-200.

- GÜNDOĞDU, M. N., 1982, Neojen yaşlı Bigadiç sedimenter baseninin jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi: Doktora tezi, 386s, 3ek, Hacettepe Üniversitesi (yayımlanmamış), Ankara.
- GÜNDOĞDU, N., 1984, Bigadiç gölsel Neojen baseninin jeolojisi, *Yerbilimleri*, 11, 91-104.
- GÜNDOĞDU, M. N., YALÇIN, H., TEMEL, A. & CLAUER, N., 1996, Geological, mineralogical and geochemical characteristics of zeolite deposits associated with borates in the Bigadiç, Emet and Kırka Neogene lacustrine basins, western Turkey, *Mineral deposits* 31, 492–513.
- HAY, R. L., 1966, *Zeolites and zeolitic reactions in sedimentary rocks*, Spec. paper no. 85, Geological Society of America, New York.
- HEWLETT, P. C., 2008, *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th edition, Elsevier, 1057p.
- HEY, M. H., BANNISTER, F. A., 1934, Studies on the zeolites, Part VIII, "Clinoptilolite," a silica-rich variety of heulandite, *Mineral magazine*, 23:556-559.
- JANOTKA, I., RAY, A., SAMARIN, A., 2003, Zeolite blended cement for better sulfate resistance, The 21st biennial of the Concrete Institute of Australia, *Concrete in the third millenium, Book of proceedings*, 233-241.
- ISO 9277/2010, Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method.
- IŞIK, H. B., 2007, Yalova termal kaynaklarının hidrojeokimyasal değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- KARA, H., 1997, 1/100.000 ölçekli açın-sama nitelikli Türkiye jeoloji haritaları serisi, Yozgat G19 paftası, No:54, MTA yayınları, Ankara.
- KARA, H. ve DÖNMEZ, M., 1990, 1:100.000 ölçekli açın-sama nitelikli Türkiye jeoloji haritaları serisi, Kırşehir G17 paftası, MTA yayınları, Ankara.
- KARAKURT, C., TOPÇU, I. B., 2011, Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete, *Construction and building materials*, Vol.25, no.4.
- KOCAKUŞAK, S., SAVAŞÇI, Ö. T., AYOK, T., 2001, Doğal zeolitler ve uygulama alanları, TÜBİTAK Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, 50s.
- KORALAY, R., SATIR, M. and DORA, O. Ö., 2001, Geochemical and geochronological evidence for Early Triassic calc-alkaline magmatism in the Menderes Massif, Western Turkey, *International journal of earth sciences*, 89, 822-835.
- KÖKTÜRK, U., YILMAZ, H., 1999, Ege bölgesi zeolit oluşumları ve çevre sağlığına etkileri, *1. Batı Anadolu hammadde kaynakları sempozyumu kitapçığı*, 419-424.

- MASSAZZA, F., 1976, Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, *Il Cemento*, no.1: 3-38.
- MERTENS, G., SNELLINGS, R., VAN BALEN, K., BİÇER-ŞİMŞİR, B., VERLOOY, P., ELSEN, J., 2009, Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity, Elsevier, *Cement and concrete research*, 39, 233-240.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü web sitesi, [http://www.mta.gov.tr/v2.0/images/turkiye\\_maden/maden\\_yataklari/b\\_h/zeolit.jpg](http://www.mta.gov.tr/v2.0/images/turkiye_maden/maden_yataklari/b_h/zeolit.jpg)
- NAIQIAN, F., XIHUANG, J. ; ZHIATO, Y., 1992, Effect and mechanism of natural zeolite for preventing expansion due to AAR, *9th International Conference on alkali-aggregate reaction in concrete*, London, Vol. 2.
- NEVILLE, A. M, 1997, *Properties of concrete*, Longman Ltd., England, 844p.
- OKAY, A. İ., 2001, Stratigraphic and metamorphic inversions in the central Menderes Massif: a new structural model, *International journal of earth sciences*, 89, 709-727.
- OKAY, A. İ. and SIYAKO, M., 1993, *The new position of the İzmir-Ankara Neo-Tethyan suture between İzmir and Balıkesir*, In: Turgut, S.(ed), Tectonics and hydrocarbon potential of Anatolia and surrounding regions, *Proceedings Ozan Sungurlu symposium*, 333-355.
- OKAY, A. İ. and TUYSUZ, O., 1999, *Tethyan sutures of northern Turkey*, In: Durand, B., Jolivet, L., Horvath, F. and Seranne, M. (eds). *The Mediterranean Basin: Tertiary Extension with the Alpine Orogen*, Geological Society, London, Special Publications, 156, 475-515.
- ONARAN, K., 2006, *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 383s.
- PERRAKI, T., KONTORI, E., TSIVILIS, S., KAKALI, G., 2010, The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements, Elsevier, *Cement & concrete composites*, 32, 128-133.
- POON, C. S., LAM, L., KOU, S. C., LIN, Z. S., 1999, A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, Elsevier, *Construction and building materials*, 13, 427-432.
- RAMACHANDRAN, V. S., BEAUDOIN, J. J., 2001, *Handbook of Analytical Techniques In Concrete Science and Technology*, Noyes Publications, 964p.
- RAMYAR, K., ANDİÇ, O., 2003, Effect of fineness and replacement level of natural zeolite powder on alkali-silica reaction, *Cement and concrete world*, vol. 8, no. 43.
- RIMMELE, G., JOLIVET, L., OBERHANSLI, R. and GOFF, B., 2003, Deformation history of the high-pressure Lycian Nappes and implications for tectonic evolution of SW Turkey, *Tectonics* 22, 1007-1029.

- RODRIGUEZ-KAMACHO, R. E., URIBE-AFIF, R., 2002, Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, Elsevier, *Cement and concrete research*, 32, 1851-1858.
- SCHALLER, W., T., 1932, The mordenite-ptilolite group: Clinoptilolite, a new species, *Am mineral*, 17:128-134.
- SCHMIDT, R., 1981, Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommision on the Systematics of igneous rocks, *Geology*, 9, 41-3. ISSN 1432-1149.
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, 2007, Dokuzuncu kalkınma planı, Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Ankara, 202s.
- Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği web sitesi, [www.tcmb.gov.tr](http://www.tcmb.gov.tr).
- Türk Dil Kurumu web sitesi, [www.tdk.org.tr](http://www.tdk.org.tr).
- TS 25/2008, Doğal Puzolan (Tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gerekler ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 2517/1977, Alkali Agregası Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3527/1980, Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3530 EN 933-1/1999, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Eleme Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1/2002, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-2/2002, Çimento Deney Metotları - Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3/2002, Çimento Deney Metotları Bölüm 3, Priz Süresi ve Genleşme Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-6/2010, Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 6: İncelik Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1/2002, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206/2014, Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-7/2000, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 7: İri Agregalarda Kavkısı İçeriğinin Tayini - Kavkısı Yüzdesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 933-8/2001, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 8: İnce Tanelerin Tayini - Kum Eşdeğeri Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-9/2001, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler -Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini - Metilen Mavisi Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-3/1999, Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3 - Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6/2002, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1367-2/1999, Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1/2011, Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Kimyasal analiz, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-6/2002, Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, TSE, Ankara.
- TS EN 12350-7/2002, Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini - Basınç Metotları, TSE, Ankara.
- TURANLI, L., YÜCEL, H., GÖNCÜOĞLU, M. C., ÇULFAZ, A., UZAL, B., 2007, Doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımı, TÜBİTAK Proje No: 104M393, 109s.
- United States Geological Survey web sitesi, [www.usgs.gov, http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zeolites/mcs-2013-zeoli.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zeolites/mcs-2013-zeoli.pdf)
- YAĞMURLU, F. H., BAYKAL., H., 1989, Gördes barajı ve çevresinin temel jeolojik özellikleri, *Türkiye jeoloji bülteni*, C.32, 1-7.
- YILMAZ, B., UÇAR, A., ÖTEYAKA, B., UZ, V., 2007, Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, Elsevier, *Building and environment*, 42, 3808-3815.

## ÖZGEÇMİŞ



### Şahsi Bilgiler

|                  |                                                                |
|------------------|----------------------------------------------------------------|
| Adı Soyadı       | Aytaç DİĞİŞ                                                    |
| Uyruğu           | T.C.                                                           |
| Doğum Yılı, Yeri | 1965, İstanbul                                                 |
| Telefon          | 0090 533 749 93 71                                             |
| e-posta          | <a href="mailto:aytacdigis@yahoo.com">aytacdigis@yahoo.com</a> |

### Eğitim

| Derece        | Kurum / Anabilim Dalı / Programı                                                                        | Yılı |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Doktora       | İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü /<br>Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı /<br>Jeoloji Mühendisliği Programı | 2015 |
| Yüksek Lisans | İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü /<br>Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı /<br>Uygulamalı Jeoloji Programı   | 1990 |
| Lisans        | İ.Ü. Mühendislik Fakültesi / Jeoloji<br>Mühendisliği Bölümü                                             | 1986 |
| Lise          | Fenerbahçe Lisesi (İstanbul)                                                                            | 1982 |