
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

MİKRONİZE EDİLMİŞ ZEOLİT İKAMELİ HARÇLARIN MİKROYAPI VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE AGRESİF ORTAMLARIN ETKİSİ

Mustafa KOP

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa KOP

21/11/2025

MİKRONİZE EDİLMİŞ ZEOLİT İKAMELİ HARÇLARIN MİKROYAPI VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNE AGRESİF ORTAMLARIN ETKİSİ

(Doktora Tezi)

Mustafa KOP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2025

ÖZET

Bu çalışmada, çimento üretiminin çevresel etkilerini azaltmak, sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmek ve harçların agresif çevresel koşullar altındaki performansını iyileştirmek amacıyla, Türkiye'de bol miktarda bulunan doğal ve kalsine edilmiş zeolitin çimento yerine ikame edilerek harç özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Harç üretiminde Manisa-Gördes yöresine ait zeolit, standart CEN kumu, CEM I çimento, sodyum naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı (SA) ve içme suyu kullanılmıştır. Doğal zeolit 600°C, 700°C ve 800°C'de bir saat süreyle pişirilerek kalsine edilmiştir. Zeolitler çimento ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilerek harç karışımları hazırlanmıştır. Taze harç numuneleri üzerinde yayılma tablası ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Ardından 50×50×50 mm küp, 25×25×285 mm harç çubuğu ve 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde silindir numuneleri üretilmiştir. Sertleşmiş numuneler üzerinde fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve mikroskobik deneyler gerçekleştirilmiştir. 50×50×50 mm küp numunelerde 28 günlük yaşta birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve kapiler su emme; 3, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. 25×25×285 mm harç çubuğu numunelerinde 0, 7, 28, 56 ve 90 gün yaşlarında boy değişimi ile ASTM C1581/C1581M standardına göre kısıtlanmış rötre deneyleri uygulanmıştır. 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde silindir numunelere klor iyonu geçirgenliği, 50×50×50 mm küp numunelere ise normal kür suyu, deniz suyu ve %15 sodyum sülfat çözeltili su kullanılarak ıslanma-kuruma deneyleri uygulanmıştır. Mikroyapı özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Sonuçlar, doğal zeolitin erken yaşlarda kontrol harcına kıyasla daha düşük basınç dayanımı sergilediğini, ancak ilerleyen yaşlarda dayanımın önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Özellikle 700°C'de kalsine edilmiş %15 zeolit ikameli (K7Z15) harç tüm yaşlarda en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Agresif ortamlardaki dayanıklılık deneyleri, K7Z15 harcının sülfat ve deniz suyu etkilerine karşı direncini artırdığını, geçirimsizlik özelliklerini ise belirgin biçimde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, K7Z15 harcı dayanıklılık ve geçirimsizlik açısından optimum performans sergileyerek çimento tüketiminin azaltılmasına ve yapıların çevresel etkilere karşı daha uzun ömürlü olmasına katkı sağlamaktadır.

Bilim Kodu : 93008

Anahtar Kelimeler : Doğal zeolit, kalsinasyon, dayanıklılık, sürdürülebilirlik

Sayfa Adedi : 101

Danışman : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

EFFECT OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTS ON THE MICROSTUCTURE AND DURABILITY PROPERTIES OF MICRONIZED ZEOLITE SUBSTITUTE MORTARS

(Ph. D. Thesis)

Mustafa KOP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2025

ABSTRACT

In this study, in order to reduce the environmental impacts of cement production, to develop sustainable construction materials, and to improve the performance of mortars under aggressive environmental conditions, the effects of replacing cement with natural and calcined zeolite, which is abundantly available in Turkey, on the properties of mortars were investigated. In the production of mortars, zeolite from the Manisa-Gördes region, standard CEN sand, CEM I cement, a sodium naphthalene sulfonate-based superplasticizer (SP), and tap water were used. The natural zeolite was calcined at 600°C, 700°C, and 800°C for one hour. Zeolites were substituted for cement at rates of 5%, 10%, 15%, and 20%, and mortar mixtures were prepared. Flow table and unit weight tests were performed on fresh mortar samples. Then, 50×50×50 mm cube, 25×25×285 mm mortar prism, and 50 mm diameter and 100 mm height cylindrical specimens were produced. Physical, mechanical, durability, and microscopic tests were carried out on the hardened specimens. For 50×50×50 mm cube samples, unit weight, ultrasonic pulse velocity, and capillary water absorption tests were performed at 28 days, while compressive strength tests were conducted at 3, 7, 28, and 90 days. For 25×25×285 mm mortar prism specimens, length change and restrained shrinkage tests were performed at 0, 7, 28, 56, and 90 days according to ASTM C1581/C1581M standard. For cylindrical specimens with a diameter of 50 mm and a height of 100 mm, chloride ion permeability tests were carried out, while wetting–drying tests were applied to 50×50×50 mm cube samples using normal curing water, seawater, and 15% sodium sulfate solution. The microstructural properties were examined using a scanning electron microscope (SEM). The results showed that natural zeolite exhibited lower compressive strength compared to the control mortar at early ages; however, the strength increased significantly at later ages. In particular, the mortar containing 15% zeolite calcined at 700°C (K7Z15) achieved the highest compressive strength at all ages. Durability tests under aggressive environments revealed that the K7Z15 mortar improved resistance to sulfate and seawater effects and significantly enhanced impermeability. As a result, the K7Z15 mortar exhibited optimum performance in terms of durability and impermeability, contributing to the reduction of cement consumption and to extending the service life of structures exposed to environmental effects.

Science Code : 93008
Key Words : Natural zeolite, calcination, durability, sustainability.
Page Number : 101
Supervisor : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın her aşamasında değerli bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve desteğiyle bana yol gösteren; yapıcı eleştirileri ve sabırlı yaklaşımıyla bu çalışmanın tamamlanmasına büyük katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve önerileriyle bana her zaman destek olan değerli hocalarım Prof. Dr. İlhami DEMİR'e, Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a ve Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince her konuda desteklerini sağlayan ve akademik deneyimlerini benimle paylaşan Milli Savunma Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Dr. Öğr. Üyesi Tuba EROĞLU AZAK'a teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca katkı ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Dursun Enes KORKUT'a teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarımın yürütülmesi sürecinde, deney düzeneklerinin hazırlanması ve deneylerin uygulanmasında sağlamış olduğu katkı ve yardımlarından dolayı İnşaat Teknikeri Recep İŞIKLI'ya teşekkür ederim. Ayrıca, destekleri ve paylaşımcı yaklaşımları için Milli Savunma Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün tüm akademik personeline teşekkür ederim.

Bugüne gelmemde sonsuz emeği bulunan sevgili annem Ayşe KOP'a ve eğitim hayatım boyunca daima destek ve moral kaynağı olan sevgili babam Muhammet KOP'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, her zaman yanımda olan sevgili ablam Arzu UZUN'a ve biricik kardeşim Hayriye KOP'a da destekleri için teşekkür ederim.

Bu süreçte sabrı, anlayışı ve desteğiyle her zaman yanımda olarak bana güç veren sevgili eşim, Bilgisayar Yüksek Mühendisi Bengisu Şeyda KOP'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi
SİMGELER VE KISALTMALAR xiv
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER 5
2.1. Portland Çimentosu 5
2.1.1. Portland çimentosu hammaddeleri 5
2.1.2. Portland çimentosunun oksit bileşenleri 6
2.2. Katkılı Çimentolar 8
2.3. Harç 9
2.4. Harç çeşitleri 10
2.4.1. Kireç harcı 10
2.4.2. Alçı harcı 11
2.4.3. Karma harçlar 11
2.4.4. Onarım harçları 11
2.5. Puzolan 12
2.6. Puzolanların Sınıflandırılması 12
2.6.1. Doğal puzolanlar 13
2.6.2. Yapay puzolanlar 23
2.7. Beton ve Harçlarda Sülfat Etkisi 30
2.7.1. Dış kaynaklı sülfat saldırısı 31
2.7.2. İç kaynaklı sülfat saldırısı 32

Sayfa

2.8. Beton ve Harçlarda Deniz Suyu Etkisi 33
2.9. Beton ve Harçta Tuzun Etkisi 34
2.10. Zeolit ile Yapılan Önceki Deneysel Çalışmalar 34
3. MATERYAL VE METOT 45
3.1. Materyal 45
3.1.1. Çimento 45
3.1.2. Zeolit 45
3.1.3. Kum 48
3.1.4. Süper akışkanlaştırıcı 49
3.1.5. Su 50
3.1.6. Deniz suyu 50
3.2. Metot 50
3.2.1. Harç deneyleri 52
3.2.2. Mikroyapı deneyleri 62
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 65
4.1. Harç Yayılma Deney Sonuçları 65
4.2. Harç Birim Ağırlıkları 65
4.3. Harç Basınç Dayanımı Deney Sonuçları 66
4.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları 68
4.5. Kapiler Su Emme Deney Sonuçları 69
4.6. Klor-İyon Geçirgenliği Deney Sonuçları 72
4.7. Harç Boy Değişimi Deney Sonuçları 73
4.8. Islanma-kuruma Deney Sonuçları 75
4.9. Kısıtlanmış Rötre Deney Sonuçları 79
4.10. Mikroyapı Deney Sonuçları 81
4.10.1. SEM analizi 81

Sayfa

4.10.2. XRD analizi 84

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 87

KAYNAKLAR 91

ÖZGEÇMİŞ 101

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 2.1.	Portland çimentosu oksit bileşimleri	6
Çizelge 2.2.	Çimento bileşenleri ve betona etkileri	7
Çizelge 2.3.	TS EN 197-1 kapsamındaki genel çimentolar	9
Çizelge 2.4.	Farklı bölgelerdeki trasın kimyasal bileşimi ve karşılaştırmalar	16
Çizelge 2.5.	Perlitin kimyasal bileşimi	17
Çizelge 2.6.	Türkiye'nin doğal zeolit yatakları ve mineral türleri	22
Çizelge 3.1.	Çimentonun özellikleri	45
Çizelge 3.2.	Zeolitin özellikleri	47
Çizelge 3.3.	CEN standart kumu tane dağılımı	49
Çizelge 3.4.	Süper akışkanlaştırıcı özellikleri	49
Çizelge 3.5.	Antalya kıyısı yüzey deniz suyu kimyasal özellikleri	50
Çizelge 3.6.	Harç karışım oranları	51
Çizelge 3.7.	Deneylerde kullanılan numunelerin boyutları, ilgili standartlar ve örnek sayıları	52
Çizelge 3.8.	TS EN 196-1 standardında belirtilen dönme hızları	53
Çizelge 4.1.	Harç numunelerinin 28 günlük birim ağırlıkları	66
Çizelge 4.2.	ASTM C 1202’ye göre klor iyon geçirgenliği değerlendirme tablosu	72
Çizelge 4.3.	Klor iyon geçirgenliği deney sonuçları	73
Çizelge 4.4.	Kısıtlanmış rötre çatlak genişlikleri	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Ham karışımı çimento klinkerine dönüştüren yakma işlemi 6

Şekil 2.2. Puzolanların sınıflandırılması 13

Şekil 2.3. Zeolit kristal yapısını oluşturan dört yüzeyin zincir bağlantıları 19

Şekil 2.4. SiO_4 veya AlO_4 tetrahedralinin görünümü 20

Şekil 2.5. Termik santralde fırında kül toplanması ve dağıtımı 24

Şekil 2.6. ASTM-C 618'e göre F ve C tipi uçucu küller 25

Şekil 2.8. Yüksek fırın cürufu elde edilmesi 28

Şekil 3.1. Zeolit lazer parçacık boyut dağılımı 46

Şekil 3.2. Zeolit(klinoptilolit) SEM görüntüsü 46

Şekil 3.3. Harç numunelerinde kullanılan doğal ve kalsine zeolit 47

Şekil 3.4. Numunelerde kullanılan zeolitin XRD grafiği 48

Şekil 3.5. CEN kumu gradasyon eğrisi 48

Şekil 3.6. Kül fırını 51

Şekil 3.7. Harç numunelerinin hazırlanması kullanılan otomatik harç mikseri 53

Şekil 3.8. Harç numunelerinin kalıplara yerleştirilmesi ve kürlenmesi 53

Şekil 3.9. Sertleşmiş harç numuneleri 54

Şekil 3.10. Harç numunelerinin yayılma tablası deneyi 54

Şekil 3.11. Harç numunelerine yapılan basınç deneyi 55

Şekil 3.12. Ultrases geçiş hızı deney aleti 56

Şekil 3.13. Kapiler(kılcallık) su emme deney düzeneği 57

Şekil 3.14. Numunelerin kesilmesi 58

Şekil 3.15. Klor iyon geçirgenliği deneyi düzeneği 58

Şekil 3.16. Hazırlanan numunelerin kür ortamı 59

Şekil 3.17. Ölçüm yapılan harç boy değişimi deney düzeneği 59

Şekil 3.18. Hazırlanan numunelerin kuruma döngüsü 61

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.19. Hazırlanan halka numuneler 62

Şekil 3.20. SEM cihazı 63

Şekil 4.1. Hazırlanan taze harçların yayılma değerleri 65

Şekil 4.2. 7 günlük basınç dayanımı 67

Şekil 4.3. 28 günlük basınç dayanımı 67

Şekil 4.4. Harçların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 68

Şekil 4.5. Ultrases geçiş hızı sonuçları 69

Şekil 4.6. Kontrol numunesi kapiler su emme deneyi 70

Şekil 4.7. Z15 karışımın kapiler su emme deneyi 70

Şekil 4.8. K7Z15 karışımın kapiler su emme deneyi 71

Şekil 4.9. Kılcallık katsayıları 71

Şekil 4.10. Normal kür ortamında boy değişimi 73

Şekil 4.11. Antalya deniz suyu kür ortamında boy değişimi 74

Şekil 4.12. %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında boy değişimi 74

Şekil 4.13. Islanma-kuruma döngüsü sonrası ağırlık kayıpları 76

Şekil 4.14. Islanma-kuruma döngüsü sonrası basınç dayanımları 77

Şekil 4.15. Islanma-kuruma döngüsü sonrası numunelerin görüntüleri 78

Şekil 4.16. %15 Sodyum sülfat ($NaSO_4$) içeriğinde 270 gün bekletilen numuneler 79

Şekil 4.17. Kısıtlanmış rötre örnek çatlak genişliği ölçümü 79

Şekil 4.18. Karışımların kısıtlanmış rötre çatlak genişliklerinin grafik gösterimi 80

Şekil 4.19. Kontrol harcı SEM analizi 82

Şekil 4.20. Z15 karışımı SEM analizi 82

Şekil 4.21. K6Z15 karışımı SEM analizi 83

Şekil 4.22. K7Z15 karışımı SEM analizi 83

Şekil 4.23. K8Z15 karışımı SEM analizi 84

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.24. Doğal zeolitin XRD analizi 85

Şekil 4.25. 600 °C'de kalsine edilmiş zeolitin XRD analizi..... 85

Şekil 4.26. 700 °C'de kalsine edilmiş zeolitin XRD analizi..... 85

Şekil 4.27. 800 °C'de kalsine edilmiş zeolitin XRD analizi..... 86

Şekil 4.28. Doğal ve kalsine zeolitin XRD analizi 86

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
°C	Santigrat
µm	Mikrometre
µs	Mikrosaniye
cm^2	Santimetre kare
cm^3	Santimetre küp
g	Gram
km	Kilometre
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
sn	Saniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
C_2S	Dikalsiyum Silikat
C_3A	Trikalsiyum Alüminat
C_3S	Trikalsiyum Silikat
C_4AF	Tetrakalsiyum Alümino Ferrit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
CaO	Kalsiyum Oksit
CEM I	Portland Çimentosu
CO_2	Karbondioksit
CS	Kalsiyum Sülfat
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat

Kısaltmalar	Açıklamalar
Fe_2O_3	Demir Oksit
H_2O	Su
K_2O	Potasyum Oksit
K6Z5	600 °C'de Kalsine Edilmiş %5 Zeolit İkameli Harç
K6Z10	600 °C'de Kalsine Edilmiş %10 Zeolit İkameli Harç
K6Z15	600 °C'de Kalsine Edilmiş %15 Zeolit İkameli Harç
K6Z20	600 °C'de Kalsine Edilmiş %20 Zeolit İkameli Harç
K7Z5	700 °C'de Kalsine Edilmiş %5 Zeolit İkameli Harç
K7Z10	700 °C'de Kalsine Edilmiş %10 Zeolit İkameli Harç
K7Z15	700 °C'de Kalsine Edilmiş %15 Zeolit İkameli Harç
K7Z20	700 °C'de Kalsine Edilmiş %20 Zeolit İkameli Harç
K8Z5	800 °C'de Kalsine Edilmiş %5 Zeolit İkameli Harç
K8Z10	800 °C'de Kalsine Edilmiş %10 Zeolit İkameli Harç
K8Z15	800 °C'de Kalsine Edilmiş %15 Zeolit İkameli Harç
K8Z20	800 °C'de Kalsine Edilmiş %20 Zeolit İkameli Harç
MgO	Magnezyum Oksit
Na_2O	Sodyum Oksit
Na_2SO_3	Sodyum Sülfat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
PbO	Kurşun Monoksit
S/Ç	Su/çimento Oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiO_2	Silisyum Oksit
SO_3	Kükürt Trioksit
TiO_2	Titanyum Dioksit
TS EN	Türk Standardı - Avrupa Normu
XRD	X-ışını kırınım
Z0	Kontrol Harcı
Z5	%5 Zeolit İkameli Harç
Z10	%10 Zeolit İkameli Harç
Z15	%15 Zeolit İkameli Harç

Kısaltmalar	Açıklamalar
Z20	%20 Zeolit İkameli Harç

1. GİRİŞ

Beton ve harç karışımlarında çimentonun ikamesi olarak mineral katkı maddelerinin kullanımı, nihai dayanım ve dayanıklılık açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Çimentoya ikame olarak kullanılan malzemeler arasında doğal puzolanlar (diatomlu toprak, volkanik kül, volkanik tüf, zeolit ve pişirilmiş kil) ile yapay puzolanlar (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü) yer almaktadır.

Dünya nüfusundaki artış, su, gıda, yerleşim alanları ve enerji gibi temel gereksinimleri ortaya çıkarmakta olup, bu artan taleplerle birlikte önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Enerji talebindeki yükselişin karşılanmasında, fosil yakıtların yenilenebilir enerji kaynakları yerine tercih edilmesi, atmosferdeki karbondioksit (CO_2) emisyonlarının artmasında önemli bir rol oynamaktadır. Paris Anlaşması ve benzeri çevresel düzenlemeler, CO_2 emisyonlarının azaltılması amacıyla alınan önlemler arasında yer alsa da, doğal kaynakların etkin kullanımı, düşük maliyet ve insan sağlığının korunması gibi faktörler, inşaat sektöründe alternatif malzemelerin incelenmesini zorunlu hale getirmektedir. Çimento ile belirli oranlarda ikame edilen doğal veya yapay puzolanlar, maliyetin düşürülmesine ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Hidratasyon sürecinde ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşenler oluşturan puzolanlar, betonun geçirimsizliğini artırabilir, kimyasal ortamdaki direncini ve mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Bu özellikler, inşaat sektöründe sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesinde önemli bir rol oynamaktadır [1,2]. Katkılı çimentoların bileşenleri arasında yer alan puzolanik malzemeler, genellikle silis ve alüminyum içermektedir [3,4].

Doğal zeolitler, fiziksel yapıları ve kimyasal özellikleri dolayısıyla enerji verimliliği, kirlilik kontrolü, tarım, hayvancılık ve madencilik gibi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Günümüzde, 50'den fazla doğal ve 150'den fazla sentetik zeolit türünün bulunduğu bilinmektedir. Analsim, hoylandit, klinoptilolit, ferrierit, eriyonit, fillipsit, laumontit, çabasite ve mordenit gibi birçok tür arasında, klinoptilolit en çok aranan özelliklere sahip olanıdır [5]. Yüksek özgül yüzey alanına sahip olan zeolit, daha fazla puzolanik reaktiviteye sahiptir [6]. Doğal zeolitin yüksek iyon değişim kapasitesi, silis bakımından zengin içeriği, düşük yoğunluğu, yüksek özgül yüzey alanı ve kristal yapısının dehidratasyona elverişli olması, bu malzemenin mineral katkı olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu

özellikler, zeolitin üstün bir malzeme olmasını sağlar [7]. Ayrıca, doğal zeolitlerin sahip olduğu yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunluk özellikleri, bu malzemelerin inşaat sektöründe hafif yapı elemanı olarak değerlendirilmesine imkân sağlar. Zeolitler, Portland çimentosu (PÇ) klinkerine kıyasla daha yumuşak bir yapıya sahip olmalarının yanı sıra, bünyelerindeki gözenekli yapı sayesinde daha kolay ve hızlı öğütülebilmektedir [8]. Bununla birlikte, doğal yapısında bulunan boşluklar nedeniyle, karışımın istenen işlenebilirliğe ulaşabilmesi için daha fazla suya ihtiyaç duyulur. Bu durumu dengeleyerek aynı kıvamda bir çimento hamuru elde edebilmek amacıyla, süper akışkanlaştırıcı (süper plastikleştirici) kimyasal katkıların kullanılması gerekmektedir [9,10]. Zeolitin bu özellikleri, çeşitli endüstriyel uygulamalarda çevre dostu ve enerji verimli alternatifler olarak dikkate alınmasını sağlar.

Doğal zeolitlerin puzolanik aktivitelerinin artırılması amacıyla çeşitli ön işlemler uygulanmakta olup, bunlardan en önemlilerinden biri kalsinasyondur. Kalsinasyon işlemi, zeolitin belirli sıcaklıklarda ısıtılarak bünyesindeki suyun uzaklaştırılması ve kristal yapısının daha reaktif hale getirilmesi sürecidir. Bu işlem sonucunda zeolitin amorf yapıya dönüşmesi sağlanarak çimento ile etkileşimi artırılmakta ve bağlayıcılık kapasitesi güçlendirilmektedir. Kalsinasyon sıcaklığının belirli bir eşiğin üzerine çıkması durumunda, yapısal değişimler nedeniyle puzolanik aktivite azalabilmektedir. Bu nedenle, optimum kalsinasyon sıcaklığının belirlenmesi, zeolitin çimento ikamesi olarak etkin kullanımında kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Kalsine edilmiş zeolitlerin daha yüksek puzolanik aktivite göstermesi, dayanım ve durabilite açısından önemli kazanımlar sağlamakta olup, özellikle agresif çevresel koşullara maruz kalan harç ve beton karışımlarında üstün performans sergilemelerine olanak tanımaktadır.

Dünya genelinde zengin rezervlere sahip olan ve yüksek puzolanik aktivite gösteren zeolit, son yıllarda Rusya, Almanya, Slovenya, Küba, Sırbistan, İspanya ve Çin gibi ülkelerde çeşitli tipleri, çimento ve beton üretim tesislerinde mineral katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [11-14].

Bu çalışmanın amacı, doğal ve kalsine edilmiş zeolitin çimento ikamesi olarak kullanımını değerlendirerek harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirmek, agresif çevresel koşullar altındaki performansını artırmak ve çimento kullanımını azaltarak daha çevre dostu bir yapı malzemesi geliştirmektir. Bu doğrultuda, farklı ikame oranları arasında

en uygun karışım oranını ve kalsinasyon sıcaklığını belirlemek amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Zeolitin yüksek SiO_2 içeriği, hidratasyon sürecinde önemli bir rol oynayarak bünyesindeki $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girip C-S-H jeline dönüşümünü sağlamaktadır. Bu reaksiyon, harcın mekanik özelliklerinin yanı sıra sülfatlı ve deniz suyuna karşı dayanıklılığının artırılmasına da katkıda bulunmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

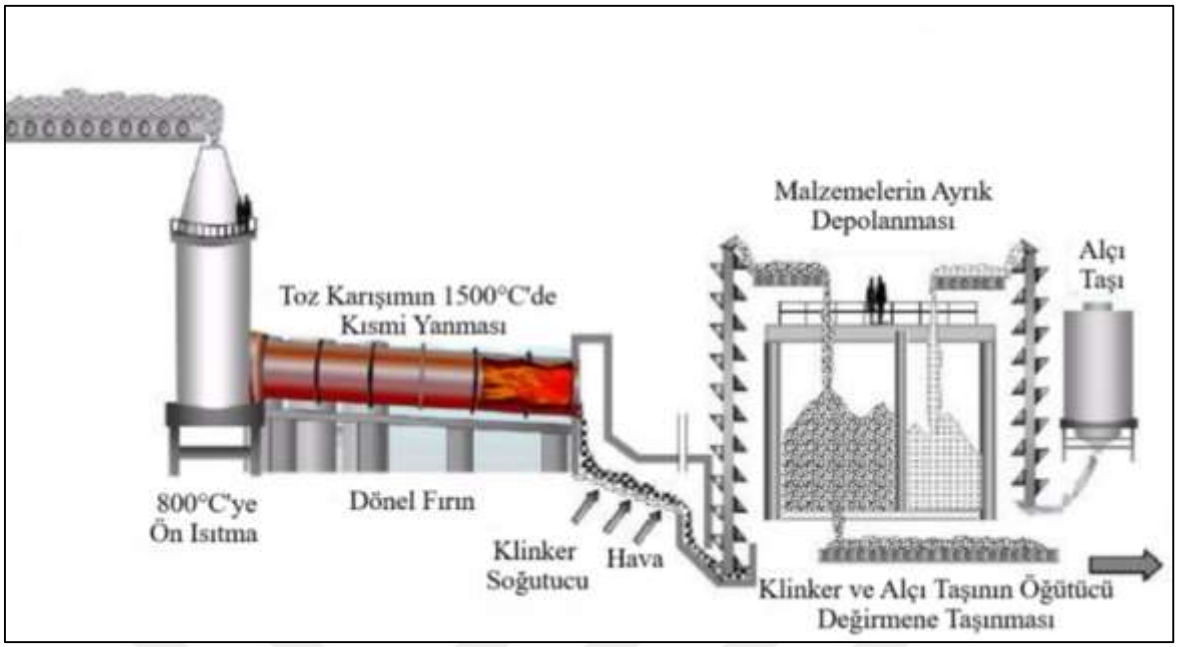
2.1. Portland Çimentosu

Çimento, insanlık tarihi boyunca çeşitli uygarlıklar tarafından önemli bir yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Antik Yunan, Roma ve Mısır medeniyetleri, farklı çimento türlerini inşaat süreçlerinde yaygın biçimde değerlendirmiştir. Çimentonun bilinen en eski arkeolojik kalıntılarına, MÖ 12 000-10 000 yıllarında rastlanmıştır. Romalılar, hidrolik çimento üretmek amacıyla kireç (kalsiyum oksit) ve puzolan (öğütülmüş volkanik kül) karışımını kullanarak, su altında sertleşebilen bir bağlayıcı geliştirmiştir. Ayrıca, kırılmış tuğla, kiremit ve seramik parçalarının agrega olarak kullanıldığı alternatif çimento türleri üretmişlerdir. Betonda kullanımı, Roma'daki Pantheon ve Kolezyum ile İstanbul'daki Ayasofya gibi günümüze kadar sağlam kalan önemli tarihi yapıların inşasında kendini göstermiştir [15].

Birçok öncü çalışmanın ardından, 1824 yılında Leeds'te yaşayan inşaat ustası Joseph Aspdin, Portland çimentosunu geliştirerek patentini almıştır. Ardından, hidrolik çimentonun kullanımı Kuzey Amerika ve Avrupa'da hızla yayılmaya başlamıştır. Bu süreçle birlikte, çimento üretiminde kullanılan ekipmanlar da gelişim göstermiştir. Portland çimentosu üretiminin artışı, ham maddeler ve çimento ile ilgili deneysel yöntemler ve karakterizasyon çalışmalarının hız kazanmasına yol açmıştır. 1900'lü yılların başlarına gelindiğinde, çimento ile ilgili laboratuvar çalışmaları büyük ölçüde standartlaştırılmıştır. Bu tarihten itibaren, dünya genelinde bazı deney yöntemleri güncellenmiş ve yeni testler eklenmiştir [15].

2.1.1. Portland çimentosu hammaddeleri

Portland çimentosunun temel hammaddeleri kireçtaşı ve kildir. Bu malzemeler ince öğütülerek döner fırınlarda 1350–1400 °C'de pişirilir. Ham karışımın çimento klinkerine dönüştürülme aşamaları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Kireçtaşı, kil, alümina, demir oksit ve silikadan oluşan hammaddeler belirli oranlarda karıştırılır; elde edilen karışım önce ince öğütülür, ardından yüksek fırında pişirilerek hidrolik bağlayıcı olan klinker elde edilir [16]. Kireçtaşı ve kilin ayrışması sonucunda CaO, SiO_2, Fe_2O_3 ve Al_2O_3 açığa çıkar; bu bileşenler yüksek sıcaklıkta birleşerek silikatlar ve alüminatlar oluşturur [17].



Şekil 2.1. Ham karışımı çimento klinkerine dönüştüren yakma işlemi [16]

2.1.2. Portland çimentosunun oksit bileşenleri

Portland çimentosunun klinkeri, kireç (CaO), silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) olmak üzere dört ana oksitten oluşur. Bu dört ana bileşen, klinkerin yaklaşık %95'ini oluşturur. Klinkerin geri kalan %5'ini ise potasyum oksit, magnezyum oksit, titanyum dioksit, sodyum oksit, fosfor oksit ve mangan oksit gibi alt bileşenler oluşturur [18]. Portland çimentosu oksit bileşimleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Portland çimentosu oksit bileşimleri [19]

Çimento Oksitleri	Kısaltma Sembolleri	Ağırlık Yüzdeleri
CaO	C	%63
SiO_2	S	%22
Al_2O_3	A	%6
Fe_2O_3	F	%2,5
Na_2O	N	%0,3
MgO	M	%2,6
SO_3	$\bar{S}$	%2
K_2O	K	%0,6
CO_2	$\bar{C}$	-
H_2O	H	-

Çimento hamur bileşiminde yaklaşık olarak %90 oranında dört ana karma oksit bulunur. Bu oksitler, kalsiyum silikatları temsil eden C_3S (trikalsiyum silikat) ve C_2S (dikalsiyum silikat), ile kalsiyum alüminatları içeren C_3A (trikalsiyum alüminat) ve C_4AF (tetrakalsiyum alümino ferrit) bileşikleridir. Çimento bileşenlerinin betona etkileri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Çimento bileşenleri ve betona etkileri [20]

		Kimyasal Ad	Faz Adı	Etkiler	Miktar
ALÜMİNATLAR	Celit	Trikalsiyum alüminat	C_3A	Yüksek miktarda ısı açığa çıkarır. Ani ve yalancı prize sebep olabilir. Sülfat etkisine karşı dayanıksızdır.	%5-10
	Ferrit	Tetrakalsiyum alüminoferrit	C_4AF	Dayanıma etkisi oldukça azdır. Çimentonun gri rengine sebep olur.	%5-15
SİLİKATLAR	Alit	Trikalsiyum silikat	C_3S	Hızlı hidrate olur ve sertleşir. Erken dayanım kazanımı sağlar.	%50-70
	Belit	Dikalsiyum silikat	C_2S	Yavaş hidrate olur. Geç dayanım sağlar. Beton geçirimsizliğine olumlu etkisi vardır.	%15-30
SÜLFATLAR	Alçıtaşı	Kalsiyum Sülfat	CS	C_3A hidratasyonunu kontrol eder. Yalancı ve ani prize neden olabilir.	%3-5

Trikalsiyum silikat ve dikalsiyum silikatın kalsiyum hidroksit oluşturmak üzere hidratlanması "Eş. 2.1 ve 2.2"de verilmiştir [20].

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \quad (2.1)$$

(trikalsiyum silikat) (su) (C-S-H) (kalsiyum hidroksit)

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \quad (2.2)$$

(dikalsiyum silikat) (su) (C-S-H) (kalsiyum hidroksit)

Bu reaksiyonlar sonucunda ana ürün kalsiyum silikat hidrat(C-S-H) oluşur. Kimyasal formülü, C-S-H jelinin bileşimine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ayrıca tobermorit jeli olarak da bilinir ve genellikle kristal olmayan bir formdadır. Buna karşın, kalsiyum hidroksit ise kristal yapıya sahip bir malzemedir.

"Eş. 2.3"te verildiği gibi, trikalsiyum alüminat alçıtaşından gelen sülfatlarla reaksiyona girerek etrenjit oluşur [20].

$$\underset{\text{(trikalsiyum alüminat)}}{C_3A} + \underset{\text{(alçı taşı)}}{3CSH_2} + \underset{\text{(su)}}{26H} \rightarrow \underset{\text{(etrenjit)}}{C_6\,AS_3H_{32}} \qquad (2.3)$$

2.2. Katkılı Çimentolar

Katkılı çimentolar bir veya birden fazla puzolanik malzeme içeren çimento türleridir. Son yıllarda, üretim süreçlerinde daha az enerji gerektirmeleri ve çimentolu sistemlerin özelliklerine olumlu katkılar sağlamaları nedeniyle bu tür çimentoların üretimi ve kullanımı artış göstermiştir. Bu katkılar arasında işlenebilirliğin artırılması, hidratasyon ısısının azaltılması, düşük geçirgenlik, yüksek nihai dayanım ve uzun vadeli dayanıklılığın iyileştirilmesi gibi avantajlar yer almaktadır.

Portland çimentosunun üretimi yalnızca yüksek enerji gereksinimiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda önemli miktarda sera gazı olan CO_2 salımı nedeniyle çevre açısından da olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu nedenle, geleneksel Portland çimentosu yerine katkılı çimentoların kullanımı, çimento endüstrisine bağlı sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar. Özellikle küresel ısınmanın iklim değişikliği üzerindeki olumsuz etkilerinin son yıllarda açık şekilde gözlemlenmesiyle birlikte, katkılı çimentoların emisyonların azaltılmasındaki rolü giderek daha kritik hale gelmiştir.

Puzolanlar, esasen Portland çimentosuna iki farklı şekilde ilave edilebilir: Bunlardan ilki, puzolanın çimento fabrikasında klinker ve alçı taşı ile birlikte birlikte öğütülmesi veya ayrı ayrı öğütüldükten sonra uygun ekipmanlarla karıştırılıp homojenleştirilmesidir. Diğer yöntem ise puzolanın, Portland çimentosu ile birlikte doğrudan beton mikserine ilave edilmesidir. TS EN 197-1 kapsamında çimento çeşitleri Çizelge 2.3'de verilmiştir [21]

.

Çizelge 2.3. TS EN 197-1 kapsamındaki genel çimentolar [21]

Ana Tipler	Genel Çimento Tipleri		Ana Bileşenler (kütlece % olarak)										Minör Bileşen
			Klinker	Yüksek fırın cürufu	Silis Dumanı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker		
						Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silisi	Kalkersi				
			K	S	D[a,b]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland Cüruflu 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 Puzolanik 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	CEM II/A-M	80-88	12-20									0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5
CEM III	Yüksek Fırın Cüruflu 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	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49			-	-	-	-	0-5

a) Çizelgedeki değerler ana ve minör ilave 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 dışındaki diğer ana bileşenler çimentoya ait işaretle beyan edilmelidir.

2.3. Harç

Harç; çimento, ince agrega (genellikle kum) ve sudan oluşan bir yapı malzemesidir. Çimentonun suyla birleşmesiyle aktif hale gelmesi sağlanır ve bu reaksiyon, harcın sertleşmesini ve dayanım kazanmasını başlatır. Harç, inşaat sektöründe genellikle yapı

elemanlarını birleştirmek, sıva yapmak ve düzgün yüzeyler elde etmek amacıyla kullanılır. Harcın dayanıklılığı, çimento, kum ve suyun doğru oranlarda karıştırılmasıyla belirlenir. Bu oranlar, harcın kullanım amacına göre değişiklik gösterir.

Laboratuvar deneylerinde, harç numuneleri çimento, kum ve su kullanılarak hazırlanır. Bu numuneler üzerine yapılan çeşitli testler, harcın özelliklerini ve performansını belirlemek amacıyla yapılır. Özellikle, bu testler ile harçtaki puzolanik malzemelerin etkinliği değerlendirilir. Puzolanlar, çimentonun kimyasal reaksiyonu ile birleşerek harcın dayanıklılığını artıran ve su geçirmezlik gibi özellikler kazandıran malzemelerdir. Laboratuvar ortamında yapılan bu deneylerle, puzolanların harç içindeki etkinliği belirlenir ve puzolanik aktiviteye sahip olup olmadıkları test edilir. Puzolanik aktivite, genellikle çimentonun su ile reaksiyona girmesiyle oluşan C-S-H bileşiklerinin miktarının ölçülmesi ile belirlenir [22].

2.4. Harç çeşitleri

Harçlar, yapı elemanlarının birleştirilmesi, sıva yapılması, düzgün yüzeylerin oluşturulması ve onarım işlemleri gibi çeşitli inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılan temel yapı malzemeleridir. Harcın temel bileşenleri çimento, kum ve su olmakla birlikte, bu bileşenler farklı bağlayıcılarla karıştırılarak çeşitli harç türleri elde edilebilir. Her bir harç türü, belirli özelliklere ve kullanım alanlarına sahip olup, seçilen bağlayıcı türüne göre sınıflandırılabilir. Bu kapsamda, harçlar genellikle kireç harcı, alçı harcı, çimento harcı, karma harçlar ve onarım harcı gibi gruplara ayrılmaktadır.

2.4.1. Kireç harcı

Kireç harcı, genellikle sönmüş kireç, su ve kum karışımından elde edilen bir harç türüdür. Bu harç, düşük mekanik dayanımına karşın esneklik açısından belirgin avantajlar sunmaktadır. Kireç harcı, özellikle tarihi yapıların restorasyonunda yaygın olarak kullanılmakta olup, havanın geçişine olanak tanıyan özelliği sayesinde duvarlarda nem birikimini engeller ve yapının daha sağlıklı bir şekilde korunmasına yardımcı olur. Zamanla karbonatlaşarak dayanım kazanan kireç harcı, bu süreçte yapısal bütünlüğünü artırır. Ayrıca, yapısal elemanlarla uyumu sayesinde çatlama riskini minimize eder. Çevre dostu özellikleri

nedeniyle, sürdürülebilir inşaat projelerinde tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır [23].

2.4.2. Alçı harcı

Alçı harcı; alçı, su ve kum karışımından oluşan bir harç türüdür ve hızlı priz alma özelliği ile dikkat çeker. Alçı harcı, genellikle iç mekanlarda, özellikle tavan ve duvar sıvalarında kullanılır. Çabuk kuruma ve sertleşme özelliği, işçilik süresini kısaltır. Estetik açıdan düzgün ve parlak yüzeyler elde edilmesini sağlar, bu nedenle dekoratif işler için sıklıkla tercih edilir. Ancak alçı harcı, suya karşı hassas olup, nemli ortamlarda dayanımı düşer ve uzun vadede bozulabilir. Bu nedenle, nemin yoğun olduğu yerlerde alçı harcının kullanımı önerilmez. Ayrıca alçı harcı, düşük dayanımlı olduğu için büyük yapısal elemanlarda kullanılmaz [24].

2.4.3. Karma harçlar

Karma harçlar, birden fazla bağlayıcının karıştırılmasıyla oluşturulan harç türleridir. Örneğin, çimento ve kireç karıştırılarak, her iki bağlayıcının da avantajlarından faydalanılır. Karma harçlar, dayanım ile esneklik arasında bir denge kurarak, hem restorasyon projelerinde hem de çeşitli yapısal onarımlarda kullanılır. Çimento ve kirecin birleşimi, özellikle farklı iklim koşullarına uyum sağlamak amacıyla tercih edilir. Bu harçlar, özellikle dış mekanlarda kullanıldığında, dayanımın arttırılmasını ve çatlama riskinin azaltılmasını sağlar. Karma harçlar, esneklik ve işlenebilirlik açısından daha geniş bir kullanım yelpazesi sunar [24].

2.4.4. Onarım harçları

Onarım harcı, mevcut yapılarda meydana gelen hasarları onarmak amacıyla geliştirilmiş özel harçlardır. Bu harçlar, genellikle çimento esaslı olup, polimer katkılarla güçlendirilmiş olabilir. Onarım harcı, hızlı dayanım kazanımı ve düşük büzülme özellikleri ile dikkat çeker. Yüksek aderans özellikleri sayesinde, eski beton veya taş yüzeylere kolayca tutunur ve kalıcı bir onarım sağlar. Onarım harcı, genellikle çatlak doldurma, beton tamiri, duvar yenileme ve zemin onarımları gibi işlemlerde kullanılır. Bu tür harçlar, yapıların yapısal bütünlüğünü hızlı bir şekilde geri kazandırır ve genellikle dış mekanlarda tercih edilir. Onarım harcı,

dayanıklılığı ve işlevselliği ile özellikle inşaat sektöründeki yenileme projelerinde önemli bir rol oynar [25].

2.5. Puzolan

Puzolan, "tek başına çok az ya da hiç bağlayıcılık özelliği olmayan, ancak ince taneli formda ve nem varlığında, normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özellikler kazanan silisli ve alüminli bir malzeme" olarak tanımlanır. Puzolanlar doğal ve yapay olarak sınıflandırılmaktadır. Doğal puzolanlar genellikle volkanik kökenli doğal minerallerden elde edilirken, yapay puzolanlar uçucu kül, silis dumanı ve seramik tozu gibi endüstriyel yan ürünlerden ya da kilin kalsinasyonu yoluyla elde edilmektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda kalsine edilen pirinç kabuğu külü veya buğday sapı külü gibi tarımsal atıklar da puzolanik özellikler kazanmaktadır [26].

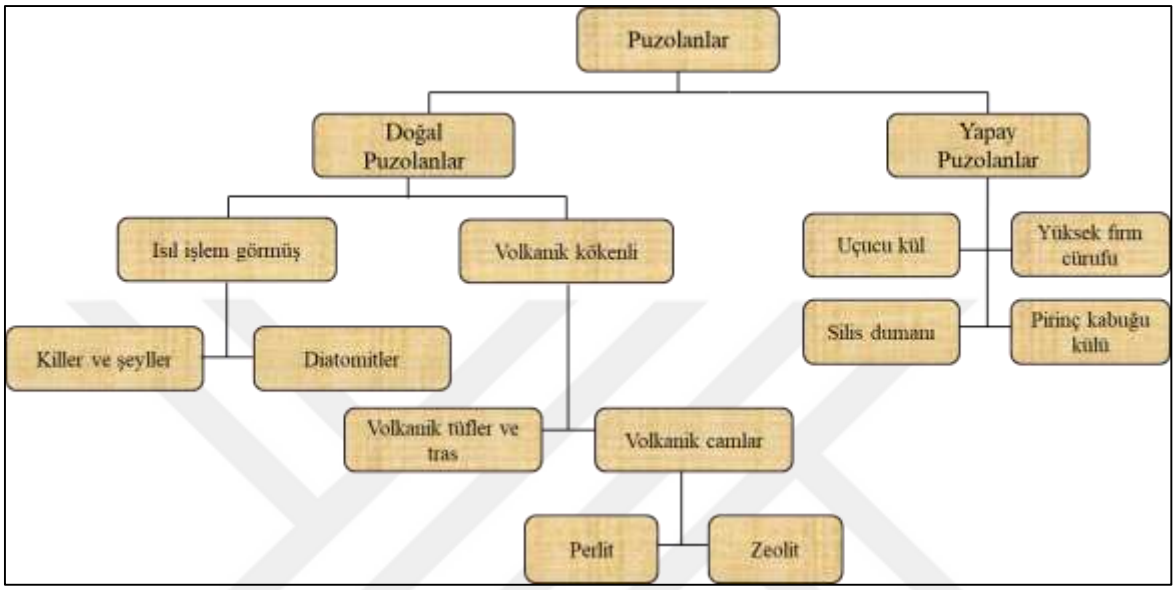
"Puzolan" terimi dünya genelinde yaygın olarak kullanılan bir terimdir, ancak bazı ülkelerde farklı isimlerle anılmaktadır. Örneğin, Yunanistan'da bu terim "Santorini toprağı," Almanya'da ise "Trass" olarak adlandırılmaktadır. Ülkemizde ise bu tür volkanik tüf karakterine sahip puzolanlara "tras" denir. Son yıllarda "tras çimentosu" ve "katkılı çimento"ya verilen önemin artmasıyla, puzolan terimi de gerçek anlamını kazanmıştır. Türkiye'de bol miktarda tras kaynağı, Orta Anadolu, Orta Ege, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde bulunmaktadır.

Türkiye'nin jeoloji haritasında yaklaşık 155 000 km²'lik bir alanı kaplayan volkanik kayaçlar bulunmaktadır ve bu alan, Türkiye'nin toplam yüzeyinin yaklaşık beşte birini oluşturmaktadır. Bu veriler, Türkiye'nin tras hammaddesi açısından zengin bir ülke olduğunu göstermektedir. Türkiye'de 1950'lerden itibaren, Portland çimentosu ile puzolanik malzemeler birlikte kullanılmaya başlanmış ve bu malzemelerin beton ile harçta bağlayıcı özelliklerinin verimli bir şekilde değerlendirildiği görülmüştür. Bu nedenle, puzolanlar çimento üretiminde önemli bir bileşen olarak kabul edilmiştir [27].

2.6. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar, doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak iki ana gruba ayrılır. Doğal puzolanlar, volkanik kökenli tortul kayaçlardan oluşmuş ve çok az değişime uğramış

malzemelerdir. Bu puzolanlar, doğal süreçlerle oluşmuş silis ve alüminyum bileşenler içerir ve çeşitli mineral kaynaklarından elde edilebilir. Yapay puzolanlar ise, endüstriyel süreçler sonucunda üretilen veya doğal malzemelerin özel işlemlerle işlenmesiyle elde edilen malzemelerdir. Puzolanların sınıflandırılması Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Puzolanların sınıflandırılması [28]

2.6.1. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar, puzolanik özellik sergileyen ve yeryüzünde doğal olarak oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler, genellikle ön işleme tabi tutularak ya da doğrudan öğütülerek kullanılabilir. Doğal puzolanlar arasında volkanik kül, tüf, tras, perlit, zeolit, diatomlu toprak ve kalsine kil gibi malzemeler yer almaktadır. Bununla birlikte, 540 °C ile 900 °C arasında bir pişirme işlemine tabi tutulan bazı killer de doğal puzolanlar arasında değerlendirilir. Kilde yeterli miktarda silis ve alümina bulunmasına karşın, doğal hali puzolanik özellik gösteremez. Bunun sebebi, kilde bulunan minerallerin kristal yapıda olmasıdır. Ancak, uygun sıcaklıkta pişirilen kilin kristal yapısı bozulur ve amorf bir yapı oluşur. Bu dönüşüm sonucunda, kalsine edilmiş kil puzolanik özellik kazanır ve bağlayıcı sistemlerde etkin bir bileşen haline gelir. Volkanik kül, volkanik kül içeren topraklar veya kalsine kilin, sönmüş kireç ve kum ile birleşmesi sonucu suya karşı dayanıklı harç oluşturulması binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Bilim insanlarının, Neolitik Çağ'a ait

Konya-Çatalhöyük yerleşiminde gerçekleştirdiği araştırmalar, bu dönemde kullanılan harçların yaklaşık 8000 yıllık olduğunu göstermektedir [29,30].

Kil, kireç veya alçı kullanılarak üretilen harçların suya dayanıklı olmadığı göz önüne alındığında, volkanik kül içeren topraklarla yapılan harçların tercih edildiği gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu durum, Çatalhöyük gibi yerleşimlerin Erciyes ve Hasan Dağı gibi volkanik dağlara yakın konumda bulunmasıyla açıklanabilir. Benzer şekilde, Girit, Rodos ve diğer birçok bölgede üç ila dört bin yıl önce inşa edilen mozaik eserler ve su yapıları, günümüzde hâlâ dayanıklılık özelliklerini korumaktadır. Bu yapılarda, kireç bazlı bağlayıcıların yanı sıra puzolanik özelliklere sahip malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Öte yandan, "puzolan" teriminin tanımlanması, bu malzemelere isim verilmesi ve beton yapımında yaygın şekilde kullanılmaya başlanması, M.Ö. 300'lü yıllarda Romalılar tarafından gerçekleştirilmiştir [31,32].

Portland çimentosunun üretimi ilk kez 1824 yılında gerçekleştirilmiş olsa da, bu dönemde doğal puzolanların kullanımına yer verilmemiştir. Beton üretiminde ince öğütülmüş puzolanik malzemelerin katkı maddesi olarak kullanılmasına ise 20. yüzyılın başlarında başlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, ince taneli doğal puzolanların beton karışımlarında yüksek oranlarda kullanıldığı ilk büyük ölçekli uygulama 1910-1912 yılları arasında hayata geçirilmiştir. [33].

Doğal puzolanların büyük bir kısmı piroklastik kayaçlardan oluşur. Piroklastik kayaçlar, volkanik patlamalar sırasında volkanik menfezden atmosfere püsküren maddelerden meydana gelir ve bu volkanik parçacıklar zamanla çökelerek sedimentler oluşturur. Piroklastik kayaçların oluşumu sırasında, iki önemli özellik ortaya çıkar: Fışkırma sürecinde maddelerin hızlı bir şekilde soğuması, kristalleşmeyi engeller ve bu maddeler volkanik cam şeklinde katılaşır. Ayrıca, yeryüzüne yaklaşırken basıncın düşmesi sonucu gazlar (genellikle su buharı, H_2O) bu maddelerde hapsolur. Bu süreç, boşluklu ve kabarcıklı bir yapı meydana getirir. Gazların patlayıcı etkisiyle oluşan az miktardaki bozulma sonucu, bu yapı ya olduğu gibi kalır ya da eğik ve iğsi (aküler) bir forma dönüşür. Her iki durumda da spesifik yüzey alanı büyür. Katılaşma sırasında fışkıran madde, cam benzeri bir yapı kazanır. Ancak, piroklastik kayaçlar yalnızca camımsı bir faz oluşturmaz [34].

Killer ve şeyller

Kil ve kil tabakaları, çubuk veya levha şeklinde olup, 0,002 mm'den küçük tanelerden oluşur. Bu küçük taneler, daha az stabil bileşenlerin parçalanmasıyla oluşur ve çoğunlukla alüminosilikat içeren kil minerallerinden meydana gelir. Kil mineralleri kristal yapıya sahiptir ve ham kil, doğal haliyle puzolanik özellik göstermez. Fakat 700°C ile 900°C arasında bir ısıl işleme tabi tutulduğunda kalsinasyon işlemi gerçekleşir ve puzolanik özellikler kazanır. Isıl işlem, kilin kristal yapısını bozar ve yarı-amorf şekillere dönüştürür ya da alümina silikat yapısına dönüştürür. Bu dönüşüm, kilin puzolanik özellik göstermesini sağlar. Kil malzemelerinin ısıl işlem görmesinde en yaygın olarak başvurulan yöntemlerden biri, döner fırınlarla yapılan uygulamalardır. Isıl işlem süresi çoğu zaman 1-2 saat arasında değişmektedir. Ayrıca, bu amaçla dikey şaft fırınları da kullanılmaktadır [35].

Şeyl, %50-60 oranında kil tanelerinden oluşan sedimanter bir kayaç türüdür. Bu kayaç, başlıca kil mineralleri olmak üzere, farklı oranlarda kalsit, dolomit, kuvars ve organik madde de içermektedir. Şeyl içerisinde bulunan kil mineralleri genellikle kaolinit, illit ve smektit gibi çeşitlerden oluşmaktadır [35].

Diatomitler

Diatomit, "kieselguhr" olarak da bilinen, tek hücreli, ökaryotik ve mikroskobik alglerin (diatomların) silisli kabuklarından oluşan organik bir sedimanter kayaçtır. Diatomlar yaşam döngülerini tamamladıktan sonra, silisli kabukları bir araya gelir, çökelir ve diatomit yataklarının oluşumunu sağlar [36].

Diatomit üretim teknolojisi, 1930'lardan itibaren önemli ölçüde gelişmiştir. Bu süreçte diatomit, filtre yardımcısı, katkı maddesi, yalıtım malzemesi ve refrakter malzeme gibi çeşitli spesifik kullanım alanlarına uygun olarak üretilmiştir. Çimento sistemlerinde diatomit kullanımı, 1950'lerden itibaren yaygınlaşmıştır. Türkiye'de diatomit üretimine yönelik çalışmalar ise 1955 yılında Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. öncülüğünde başlamıştır [37].

Diatomit; yüksek gözeneklilik, hafiflik, düşük ısı, ses ve elektrik iletkenliği, 1400-1600 °C arasında değişen erime noktası, kimyasal maddelere karşı dayanıklılık ve düşük yoğunluk gibi fiziksel özellikleri sayesinde çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde

kullanılmaktadır. Bu özellikleri, diatomitin dolgu malzemesi, yalıtım malzemesi, hafif yapı malzemesi, çimento puzolanik katkısı, refrakter malzeme ve absorban gibi alanlarda tercih edilmesini sağlamaktadır [36,38]

Volkanik tüfler ve tras

Volkanik tüf ve tras, volkanik patlamalar sonucu oluşan piroklastik malzemelerin zamanla sıkışarak katılaşmasıyla meydana gelen doğal puzolanlardır. Volkanik tüf, kül, lav parçacıkları ve pomzanın birleşimiyle oluşan, gözenekli bir kayaçtır. Tras ise tüflerin uzun süreçlerde oluşmuş, ince taneli ve kireçle reaksiyona girerek bağlayıcı özellik kazanan özel bir türüdür [39].

Tarih boyunca tras, özellikle Antik Roma döneminde, kireçle karıştırılarak suya dayanıklı harçların yapımında kullanılmıştır. Roma su kemerleri, kubbeler ve limanlar gibi yapılar, trasın dayanıklılık sağlayan özelliklerini ortaya koyar. Ülkemizde ise Batı Anadolu ve İç Anadolu bölgelerindeki tras yatakları, geleneksel yapı tekniklerinde önemli bir yere sahiptir.

Çizelge 2.4'te, Türkiye'deki bazı tras yataklarının kimyasal bileşimleri ile Avrupa'da çimento üretiminde kullanılan traslara ait veriler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur [39].

Çizelge 2.4. Farklı bölgelerdeki trasın kimyasal bileşimi ve karşılaştırmalar [39]

Oksit(%)	İtalya	Santorin	Ren	Uşak	Kayseri	Bitlis	Niğde	Ayvacık	Tatvan
SiO_2	55,7	63,2	54,2	64,48	64	67,80	88,1	63,79	64,72
Al_2O_3	19	13,2	16,4	17,07	15,13	18,7	1,45	17,44	18,52
Fe_2O_3	4,6	4,9	3,8	6,06	4,85	5,2	1,99	3,21	7,18
CaO	5	4	3,8	3,44	5,65	-	2,13	1,47	2,20

Perlit

Perlit, magmanın asidik fazında oluşan lavın soğuması sırasında yapısında su damlacıkları barındıran bir tür volkanik camdır. Bu cam, gözle veya mikroskopla incelendiğinde, gözle görülebilen veya mikroskopla tespit edilebilen bir yapıya sahip olur. Bazı perlit çeşitleri

kırıldıklarında, yüzeylerinde inci benzeri parlaklığa sahip küçük kürecikler meydana gelir. Bu nedenle, "perlit" sözcüğü kökenini Fransızca'da "inci" anlamına gelen "perle" kelimesinden almıştır [40].

Ham perlit, doğal perlit kayasının boyutlandırılıp öğütülmesiyle elde edilen formudur. Renk skalası ise yarı saydam açık griden parlak siyaha kadar geniş bir aralıkta değişebilir. Ham perlitin en karakteristik özelliği, yapısındaki %2,5 oranındaki hidratlı cam benzeri silikanın içerdiği stabilite sağlayan sudur [40].

Ham perlit, 750°C ile 1200°C arasında ani bir ısıtma işlemine tabi tutulduğunda, içerisinde bulunan suyun buharlaşması sonucu, buharın etkisiyle perlitin hacmi genişler. Bu genişleme, cam benzeri tanelerden oluşan bir köpük yapı oluşmasına neden olur. Ham perlit, hacminin yaklaşık 4 ila 20 katına kadar genişleyebilir ve bu süreç sonunda genişletilmiş perlite dönüşür. Isıtma işlemi sırasında, perlitin rengi beyazlaşır. Çizelge 2.5'te perlitin tipik kimyasal bileşimi verilmiştir [40].

Çizelge 2.5. Perlitin kimyasal bileşimi [40].

Kimyasal bileşim	Miktar (%)
SiO_2	71,0-75,0
Al_2O_3	12,5-18,0
Na_2O_3	2,9-4,0
Fe_2O_3	0,1-1,5
CaO	0,5-2,0
K_2O	0,5-5,0
H_2O	2,0-5,0
TiO_2	0,03-0,2
MgO	0,02-0,5
MnO_2, FeO, Cr	Cr 0,0-0,1
PbO	0,0-0,03
Ba	0,0-0,05
NiO, Cu, B, Be	Çok az
SO_3	0,0-0,2

Zeolit

Zeolit, doğal veya yapay olarak bulunabilen, atomik seviyede gözenekli bir yapıya sahip ve su içeren alümina silikat bileşiklerine verilen isimdir. Bu mineralin keşfi, 1756 yılında İsveçli mineral bilimci Fredrick Cronstedt tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu kristaller, ısıtıldıklarında yapılarındaki suyun köpürerek buharlaşması nedeniyle, Yunancada "kaynayan taş" anlamına gelen zeolit olarak adlandırılmıştır. Zeolitler, iki yüzyıl boyunca volkanik kayaçların boşluklarında mineral olarak gözlemlenmiş, ancak kristal yapıları detaylı olarak incelenmemiştir. Zeolitler üzerine yapılan ilk deneysel çalışmalar, A. Dumour tarafından 1857 yılında gerçekleştirilen su tutma özelliğinin geri dönüşümü (dehidrasyon) üzerine yapılan araştırma ve E. Erchorn tarafından 1858 yılında yürütülen iyon değişim özellikleriyle ilgili incelemelerdir [41].

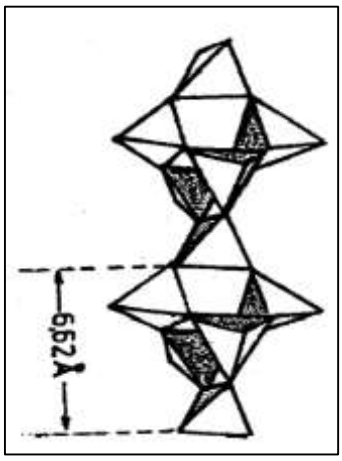
Zeolitlerin kristal yapı analizi, 1933 yılında L. Pauling ve W.H. Taylor tarafından X-ışını tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, zeolitlerin 3-10 Å arasında değişen kanallar ve boşluklara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu boşluklar, yük dengesi sağlayan su molekülleri ve katyonlar ile doludur. Katyonlar ve su molekülleri; yer değiştirme, geri dönüşümlü dehidrasyon ve iyon değişimi gibi serbest hareket özellikleri sergiler. Zeolitlerdeki boşluklar sabit boyutlara sahip olup, belirli molekülleri seçici olarak tutma özelliği gösterir. Bu nedenle zeolitler, “moleküler elek” olarak kullanılmaktadır [42].

Zeolitler, alkali ve toprak alkali metal kristal yapısına sahip, su içeren alümina silikat bileşimleri nedeniyle son 30 yıldır kimya endüstrisinde iyon değiştirici, adsorban ve katalizör olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları; moleküler elek işlevi, yüksek iyon değişim kapasitesi, düzenli kristal yapısı, mikro gözenekli yapısı, su emme özelliği ve kurutulduğunda yapıdaki katyonları ağ yüzeyinden uzaklaştırma yeteneği gibi özelliklerine bağlı olarak çeşitlenmektedir. Ayrıca, zeolitlerin düşük yoğunluğa sahip olması, yapıştırıcı olarak kullanılabilmesi ve silika içeriği taşıması, özellikle çevresel analitik kimya başta olmak üzere çeşitli alanlarda kullanımını mümkün kılmaktadır [43,44].

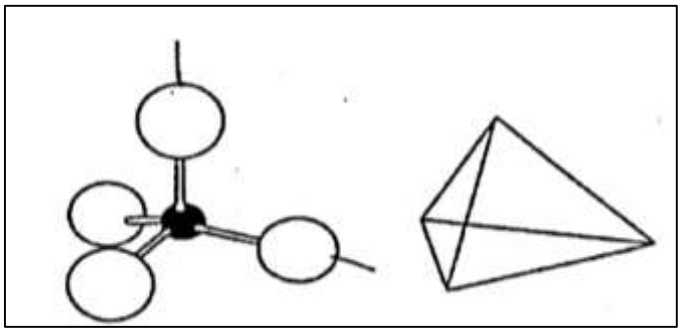
Zeolit kristalinin en küçük birimi, dört yüzeye sahip AlO_4 veya SiO_4 tetraederleridir. Silisyum (Si) ve alüminyum (Al) tetraederlerinden oluşan birincil yapı birimlerinin birleşmesiyle, tekli ve çiftli halkalar gibi ikincil yapı birimleri ve yüksek simetrili parametreler ortaya çıkar. Bu birimler, üç boyutlu farklı şekillerde düzenlenerek

mikrogözenekli bir zeolit iskeleti oluşturur. İskelete bağlı olarak, ikincil ve üçüncül yapı birimleri arasında boşluklar ve kanallar meydana gelir. Sonuçta, zeolit minerallerinin toplam hacminin %20 ile %50'si boşluklardan oluşmaktadır [45].

Zeolitler, SiO_4 ve AlO_4 tetraederlerinin üç boyutlu sonsuz bağlantılarıyla oluşan temel bir silikat yapısına sahiptir. Yapıdaki her oksijen atomu, iki dörtgenle paylaşılır (Şekil 2.3). Bu düzenleme sonucunda, atomik oran O/(Al-Si) = 2 oluşur. Tetraederlerdeki 3 değerlikli alüminyumun varlığından kaynaklanan negatif yük, Ca, K, Na gibi alkali metaller ve toprak alkali iyonları ile denetlenir (Şekil 2.4). Tam dengelemiş bir yapıda, alüminyum, en fazla 1/1 oranında silisyum ile yer değiştirir. Bu durum, feldspat grubu minerallerde de gözlenen şekilde, temel silikat iskeletindeki negatif yüklerin Ca, K ve Na gibi katyonlarla dengeye getirilmesiyle açıklanabilir. Ancak, feldspat minerallerindeki pozitif yüklü katyonlar, yapının içinde küçük boşluklarda yer alır ve etraflarındaki oksijen atomlarıyla tamamen çevrili oldukları için yer değiştiremezler, aksi takdirde yapı bozulur. Zeolitlerde ise bu durum farklı bir şekilde gerçekleşir [41]. Alümina silikatın temel yapısında, Ca, Na, K katyonlarıyla dolu boşluklar daha büyüktür ve tüm boşlukları dolduramadıklarından dolayı kolayca yer değiştirebilirler [46].



Şekil 2.3. Zeolit kristal yapısını oluşturan dört yüzeyin zincir bağlantıları [42]



Şekil 2.4. SiO_4 veya AlO_4 tetrahedralinin görünümü [46]

Zeolitler, genel olarak $M_2/nO \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ şeklindeki ampirik formülle tanımlanır. Burada x, silika miktarını, n ise M katyonunun değerliğini belirtir. Kristal yapıları baz alındığında ise zeolitlerin birim hücre formülü $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot wH_2O$ biçiminde ifade edilir. Bu yapıda alüminyum ve silisyum tetrahedralleri, alkali veya toprak alkali katyonlarla birlikte üç boyutlu bir gözenekli iskelet oluşturur. Formülde M_x katyon yükünü, n katyon sayısını, w su moleküllerinin miktarını gösterirken; (x + y) toplam tetrahedra sayısını temsil eder. Ayrıca y/x oranı, zeolitin türüne bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Zeolitlerin kristal yapılarında yer alan kanallarda bulunan su molekülleri, bu minerallerin karakteristik özelliklerinden biridir. Yapı içerisinde suyun yerleşebileceği boşluklar mevcuttur ve bu alanlarda Na, Ca ve K gibi katyonlar su molekülleriyle çevrelenmiş haldedir. Su molekülleri, bir yandan pozitif yüklü katyonlara, diğer yandan ise silikat yapıya zayıf bağlarla tutunur. Özellikle kalsiyum içeren zeolitler, diğer katyon türlerini içerenlere kıyasla daha fazla su barındırır. Chabazite, heulandite ve stilbite gibi minerallerde, su moleküllerinin potasyum yerine kalsiyum katyonlarıyla daha kuvvetli etkileşim kurduğu gözlemlenmiştir [42, 47].

Zeolitler 100-350 °C aralığında ısıtıldığında, su molekülleri belirli bir sıcaklıkta değil, sürekli olarak yapıdan ayrılır ve bu süreç, yapının değişmeden kalmasını sağlar [42, 48]. Pek çok zeolitin kristal yapısı, dört yüzlü birimlerin birleşerek oluşturduğu çok yüzeyli yapıların üçlü bağlantılarıyla meydana gelir. Bu çok katmanlı birimlerin birbiriyle bağlanma biçimi, zeolitlerin sahip olduğu kanal sisteminin yönünü ve yapısını belirlemektedir. Oluşan kanallar, yapıya bağlı olarak tek, çift ya da üç yönlü olarak düzenlenebilir [42]. Zeolitlerin en karakteristik özelliği, içerdikleri gelişmiş gözenek yapısıdır. Bu gözenekler sayesinde sıvı ve gaz molekülleri yapı içerisine rahatlıkla giriş yapabilir. Renk özellikleri, iyon değiştirme

kapasiteleri, düşük yoğunlukları ve ince kristalli yapıları ile birlikte bu gözenekli yapı, zeolitlerin çok sayıda endüstriyel uygulamada tercih edilmesini sağlamaktadır. [45].

Sedimanter kayaçlardaki zeolitlerin çoğu, sedimanların birikmesinin ardından alüminosilikatların saf suyla kimyasal reaksiyona girmesiyle oluşur. Volkanik camların büyük bir kısmı, doğal zeolitlerin oluşumuna en uygun alüminosilikatlardır. Uygun jeolojik ve kimyasal koşullar altında kil mineralleri, feldspatlar, feldspatik bileşikler ile alüminyum-silisyum bazlı jeller zamanla zeolit yapılarına dönüşebilmektedir [42]. Zeolitler oluşumlarına göre altı grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar:

1. Volkanik kökenli malzemelerin tuzlu göl ortamlarında birikmesi ve bu malzemelerin göl suyu ile kimyasal etkileşime girmesi sonucu oluşan zeolit yataklarıdır. Amerika Birleşik Devletleri ve Doğu Afrika'daki Büyük Rift Vadisi gibi alanlarda, bu tür zeolit oluşumları hem eski hem de yeni göl havzalarında geniş ölçekte yayılım göstermektedir.
2. Volkanik kökenli malzemelerin, tatlı veya düşük tuzluluk düzeyine sahip göl ortamlarında birikmesi ve bu ortam suyuyla kimyasal tepkimelere girmesi sonucu meydana gelen zeolit yataklarıdır. Bu tür oluşumlara, özellikle Kuzey ve Güney Amerika kıtalarında geniş alanlarda rastlanmaktadır.
3. Kıyı veya derin deniz ortamlarında biriken volkanik materyalin deniz suyu ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluşan zeolit yataklarıdır. Bu yataklar genellikle homojen ve kompakt bir yapıya sahip olup, tek bir zeolit minerali %95,2'ye kadar saf olabilir. Bu tür yataklar Japonya, Bulgaristan ve Rusya gibi ülkelerde gözlemlenmiştir.
4. Düşük ısı ve gömme metamorfizması geçirmiş volkanik materyaller veya diğer Al-Si materyallerinden oluşan zeolit yataklarıdır. Bu yataklar, saf olmadıkları için ekonomik açıdan değerli değildir.
5. Al-Si materyallerinin hidrotermal su veya sıcak su kaynakları etkisiyle bozulması sonucu oluşan zeolit yataklarıdır.
6. Göller veya denizlerde oluşmuş ancak kaynağının volkanik materyal olduğu gözlemlenmeyen zeolit yataklarıdır. Bu tür zeolit oluşumları genellikle ikinci dönem sedimanter tabakalarda gömülü halde bulunur. Bu yataklara örnek olarak, New Jersey (ABD) Triyas yaşlı sedimanter tabakalarındaki analsim katmanları ve Rusya'daki Permiyen ile Kretase yaşlı kayaçlarda gözlemlenen analsim ve klinoptilolit açısından zengin tabakalar verilebilir [42].

Türkiye, doğal zeolitlerin oluşumu açısından uygun jeolojik özelliklere sahip olmasına rağmen, analsim varlığı ilk kez 1971 yılında Göynük-Gölpazarı yöresinde keşfedilmiştir. Daha sonra, Ankara'nın batı kesimlerinde hem klinoptilolit hem de analsim içeren yataklara rastlanmıştır. Ülke genelinde volkanik sedimanter kayaçların yaygınlığına bağlı olarak çoğunlukla analsim ve klinoptilolit türleri görülmekte, diğer zeolit türleri ise daha nadiren rastlanmaktadır. Türkiye'de şimdiye dek en ayrıntılı çalışmalar Manisa-Gördes bölgesinde gerçekleştirilmiş olup, burada yaklaşık 18 milyon tonluk görünür zeolit rezervine ek olarak, 20 milyon ton civarında zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Türkiye'de ekonomik olarak en önemli ve kolay işletilebilir sahalardan biri Balıkesir-Bigadiç yöresinde yer almakta olup, bu alandaki rezervin 1995 yılı itibarıyla yaklaşık 500 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Diğer bölgelerde yeterli düzeyde inceleme yapılmamış olmakla birlikte, ülke genelindeki toplam doğal zeolit rezervinin yaklaşık 50 milyar ton seviyelerinde olduğu değerlendirilmektedir [49]. Türkiye'deki doğal zeolit yatakları ve bu sahalarda rastlanan mineral türleri Çizelge 2.6'te sunulmuştur [43].

Çizelge 2.6. Türkiye'nin doğal zeolit yatakları ve mineral türleri [43]

Zeolit Yatakları	Zeolit Türleri
Manisa, Gördes	Klinoptilolit, Kuvars, Holandit, Erionit, Muskovit, Analsim, Mordenit
Balıkesir, Bigadiç	Analsim, Klinoptilolit, Kuvars, Holandit, Şabazit, Muskovit, Mordenit, Dakiardit, Erionit
Kütahya, Emet	Analsim, Klinoptilolit
Çanakkale, Gelibolu	Klinoptilolit
Bursa, Mustafa Kemal Paşa	Klinoptilolit, Holandit
Edirne, Keşan-Uzunköprü	Klinoptilolit
Eskişehir, Kırka	Klinoptilolit, Holandit, Filipzit
Yalova, Karamürsel	Klinoptilolit
Kütahya, Gediz	Klinoptilolit, Analsim
Ankara, Beypazarı	Klinoptilolit, Analsim, Şabazit, Wairakit
İstanbul, Şile	Mordenit
Nevşehir, Ürgüp	Klinoptilolit, Analsim, Mordenit, Şabazit
İzmir, Urla	Analsim
Afyon, Sandıklı	Klinoptilolit, Analsim, Şabazit
Ankara, Kalecik	Analsim
Kütahya, Şaphane	Klinoptilolit
Ayaş-Polatlı- Çayırhan-Nallıhan	Analsim
Çorum-Çankırı-Şabanözü	Analsim
İzmir, Çeşme, Foça	Klinoptilolit, Mikrokilin, Holandit
Isparta, Gölcük	Erionit, Mordenit, Şabazit
Manisa, Yağmurlu	Klinoptilolit, Kuvars, Holandit, Kalsit, Mikrokilin

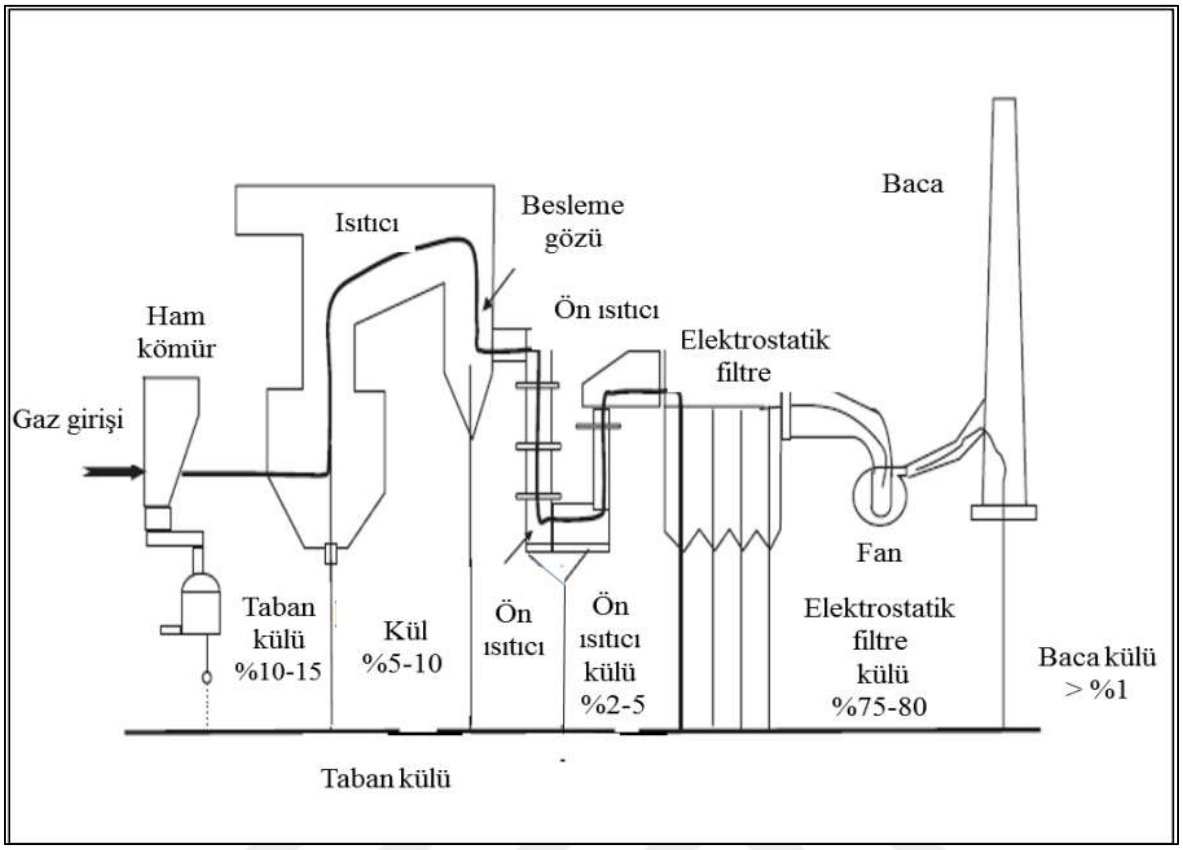
Türkiye'de kesin bir doğal zeolit rezerv tespiti yapılmamaktadır. Bunun başlıca nedeni, zeolit yataklarının sınırlarının belirlenmemiş olmasıdır. Gördes, Emet, Bigadiç, Karamürsel ve Kırka gibi bazı sahalarda gerçekleştirilen detaylı jeolojik çalışmalar, bu bölgelerde milyar ton mertebesinde zeolitik tüf rezervi bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle Gördes ve Bigadiç bölgelerindeki kayaçların ortalama zeolit içeriği yaklaşık %80 seviyelerindedir. Türkiye yüksek miktarda ve kaliteli doğal zeolit kaynaklarına sahip olmasına karşın, söz konusu minerallerin kullanım alanları ve işlenebilirliği konularında yeterli bilgi ve teknik altyapının bulunmaması, bu kaynakların etkin bir şekilde değerlendirilmesini sınırlamaktadır [49].

2.6.2. Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar, genellikle endüstriyel süreçlerin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan ve puzolanik özellikler sergileyen malzemelerdir. Bu tür malzemeler arasında en sık kullanılanlar; uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanıdır. Ayrıca, özellikle Hindistan, Pakistan ve Çin gibi Asya ülkelerinde, pirinç kabuğu külü de yaygın şekilde tercih edilen bir yapay puzolan türü olarak dikkat çekmektedir.

Uçucu kül

Uçucu kül, enerji üretimi için öğütülmüş kömürün yakıt olarak kullanılması sonucu bir yan ürün olarak elde edilir. Bu kül, demir oksit, karbon, kalsiyum oksit, magnezyum oksit içeren çok yüksek miktarda silika ve alümina içerir. Elektrik üretimi amacıyla çalışan termik santrallerde kullanılan kömür türüne bağlı olarak, yanma süreci sonucunda belirli oranlarda kül oluşmaktadır. Bu oran taşkömürü için yaklaşık %10–15 iken, linyit kömüründe %20–50 aralığına kadar çıkabilmektedir. Yanma sonucu oluşan küllerin önemli bir bölümü (%75–85), baca gazlarıyla birlikte sistemden taşınmakta ve bu şekilde oluşan atıklar “uçucu kül” olarak tanımlanmaktadır. Termik santrallerde külün fırın içinde birikimi ve sistemden uzaklaştırılması süreci Şekil 2.5’te şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca, bu kül parçacıkları amorf bir yapıya sahip olup, parçacık boyutları 1 μm ile 150 μm arasında değişmektedir [50].



Şekil 2.5. Termik santralde fırında kül toplanması ve dağıtımı [51]

1932 yılından itibaren, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki California Üniversitesi, Berkeley'de E. Davis ve diğer çalışma arkadaşları olan R. W. Carlson, J. W. Kelley ve H. E. Davis tarafından ortaklaşa yapılan araştırmalarda, %30-50 oranında uçucu kül eklenmesiyle çimentonun yerine kullanılmasının, istenilen özelliklere sahip betonların kolayca elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Uçucu külün beton teknolojisinde katkı malzemesi olarak kullanımı, ilk kez 1937 yılında uygulamaya geçmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nin Montana eyaletinde 1948 yılında yapımı tamamlanan Hungry Horse Barajı, uçucu kül içeren betonun kapsamlı olarak kullanıldığı ilk önemli yapılardan biri olarak kayıtlara geçmiştir. Bu yapıda, çimentonun %32,4'lük kısmı uçucu kül ile değiştirilmiştir [52].

Uçucu küller, ASTM C 618 standardında yer alan sınıflandırmaya göre, F ve C sınıfı olarak iki ana grupta değerlendirilmektedir [53];

- F sınıfı uçucu kül, bitümlü kömürün yanması sonucu oluşur ve genellikle yüksek oranda

silis (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içerir; bu üç bileşenin toplam oranı %70'in üzerindedir. İçeriğindeki kalsiyum oksit (CaO) miktarı %10'un altında kaldığından, bu tür küller düşük kalsiyumlu olarak nitelendirilir. F sınıfı uçucu kül, bağlayıcı özellik göstermese de çimento ile reaksiyona girerek puzolanik davranış sergiler[53].

- C sınıfı uçucu kül, linyit ya da yarı-bitümlü kömürlerin yanması sonucunda elde edilir. Bu kül türü, toplam SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeriği %50'nin üzerinde olmakla birlikte, %10'un üzerinde kalsiyum oksit (CaO) içerdiğinden yüksek kalsiyumlu olarak sınıflandırılır. C sınıfı uçucu kül yalnızca puzolanik değil, aynı zamanda hidrolik bağlayıcı özellikler de gösterebilir. ASTM C618 standardına göre F ve C sınıfı uçucu küllere ait bazı örnekler Şekil 2.6'da sunulmuştur[53].



Şekil 2.6. ASTM-C 618'e göre F ve C tipi uçucu küller

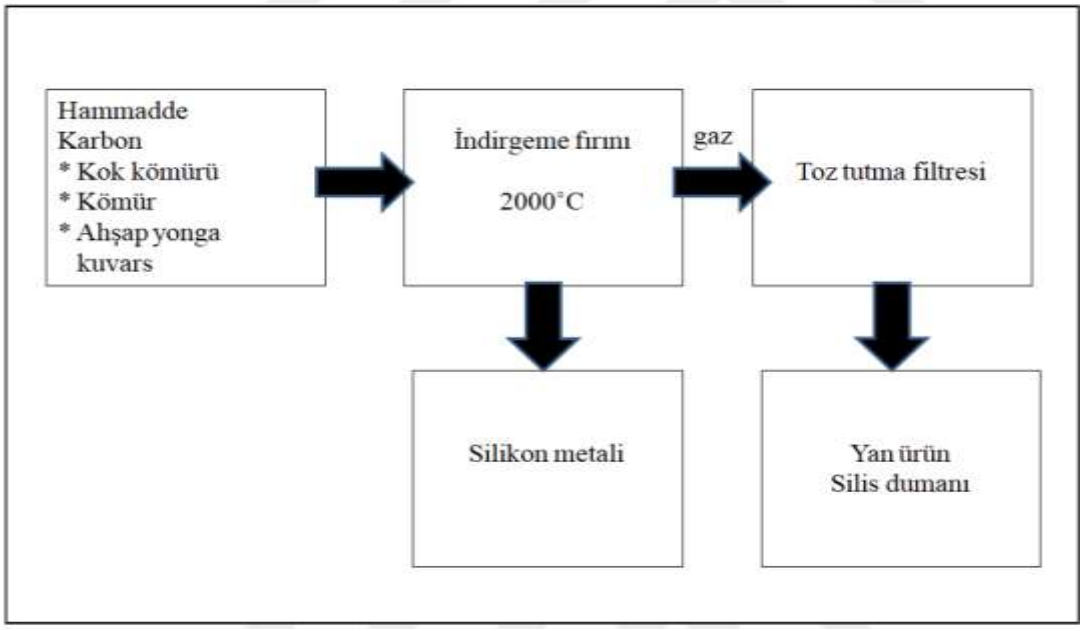
Uçucu kül, TS EN 197-1 standardına göre silisli (V) veya kalsiyumlu (W) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Silisli uçucu kül, yalnızca puzolanik özellikler gösterirken, kalsiyumlu uçucu kül hem hidrolik hem de puzolanik özelliklere sahip olabilmektedir [21].

- Silisli uçucu kül, genellikle puzolanik özellik gösteren, küresel biçimli ince tanelerden oluşur. Bu tür uçucu külün temel bileşenleri reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) olup, daha düşük oranlarda demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer minör bileşikler de yapıda yer alır. Reaktif kalsiyum oksit (CaO) içeriği %10'un altında olup, bu kül türünde reaktif silikanın %25'in üzerinde olması gerekir [21].
- Kalkerli uçucu kül, ince taneli yapısıyla puzolanik ve/veya hidrolik davranış gösterebilen bir mineral katkı malzemesidir. Yapısında başlıca reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif

silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunur. Daha düşük oranlarda ise demir oksit (Fe_2O_3) ve çeşitli ikincil bileşenler yer alır. Bu tür uçucu külün %10'dan fazla reaktif CaO içermesi ve reaktif silika miktarının %25'in üzerinde olmalıdır [21].

Silis dumanı

Silisyum metali veya silisyum metal alaşımları, yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen bir indirgeme işlemiyle elde edilmektedir. Bu süreçte, SiO'dan oluşan gazlar açığa çıkar. SiO gazı, fırının içinde yer alan soğuk hava ile temas ettiğinde hızla yoğunlaşır ve bu durum SiO'nun amorf yapıda SiO_2'ye dönüşmesine neden olur. Böylece, partikül boyutu 0,1 µm - 0,2 µm arasında değişen bir atık malzeme elde edilir. Bu malzeme, %85-98 oranında silis içermekte olup, "yoğunlaştırılmış silis dumanı" ya da kısaca "silis dumanı" olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, "mikro silis" veya "silis tozu" olarak da bilinmektedir. Silis dumanının elde edilme süreçleri Şekil 2.7'de sunulmuştur [54].



Şekil 2.7. Silis dumanı elde edilmesi [54]

Silis dumanının tane boyutu çimento tanelerinin yaklaşık %1'ine kadar küçülebildiği yüksek aktiviteye sahip amorf bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde, silis dumanı mükemmel bir puzolanik malzeme olarak çimento üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, aynı zamanda beton katkı maddesi olarak da tercih edilmektedir. Beton üretiminde kullanılan çimento miktarı, %10 oranında azaltılarak yerine silis dumanı ikame edilmektedir. Silis

dumanının yüksek puzolanik aktivitesi, bu malzeme ile yüksek dayanımlı betonların üretimini mümkün kılmaktadır [55].

Yoğunlaşmamış silis dumanı taşınabilir olmayıp, yalnızca üretildiği bölgelerde muhafaza edilmektedir. Bu malzeme çoğunlukla onarım ve grout harçlarında tercih edilmekte olup, çapı yaklaşık 0,02–0,25 μm arasında değişen, küresel ve camsı tanelerden oluşmaktadır [51]. Yoğunlaştırılmış silis dumanı, yaklaşık 20.000 m^2/kg'lık özgül yüzey alanına sahiptir. Silis dumanının yoğunluğu 2,2–2,5 g/cm^3 aralığında bulunurken, Portland çimentosu için bu değer 3,0–3,15 g/cm^3 arasındadır. Geçirimsizlik açısından yüksek performans istenen uygulamalarda, silis dumanı genellikle çimentonun %5–10'u oranında ikame edilmektedir [56]. ASTM C1240 standardı, silis dumanı kullanım oranını en fazla %10 ile sınırlamaktadır [57].

Silis dumanı katkısı, özellikle C_3S hidratasyonunu hızlandırır. Bu reaksiyonda silis dumanı, C–S–H jelini bağlayarak ve dönüştürerek etkisini gösterir. Bu nedenle, silis dumanı, içinde daha fazla C_3S bulunan çimentolarda daha verimlidir [58].

Silis dumanı ilavesi, betonun kohezyonunu artırarak segregasyonu azaltmakta ve yüzeydeki su kusmasını neredeyse tamamen ortadan kaldırmaktadır. Bu özellikler nedeniyle betonun işlenebilirliği bir miktar zorlaşmakta ancak daha dayanıklı bir yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, silis dumanı sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini geliştirerek basınç dayanımı, düşük geçirgenlik, elastisite modülü ve uzun vadeli dayanıklılık gibi parametreler üzerinde olumlu etkiler göstermektedir. Bu sayede, betonun aşınmaya karşı direnci artarken, sülfat etkilerine karşı korunumu da iyileşmektedir [54].

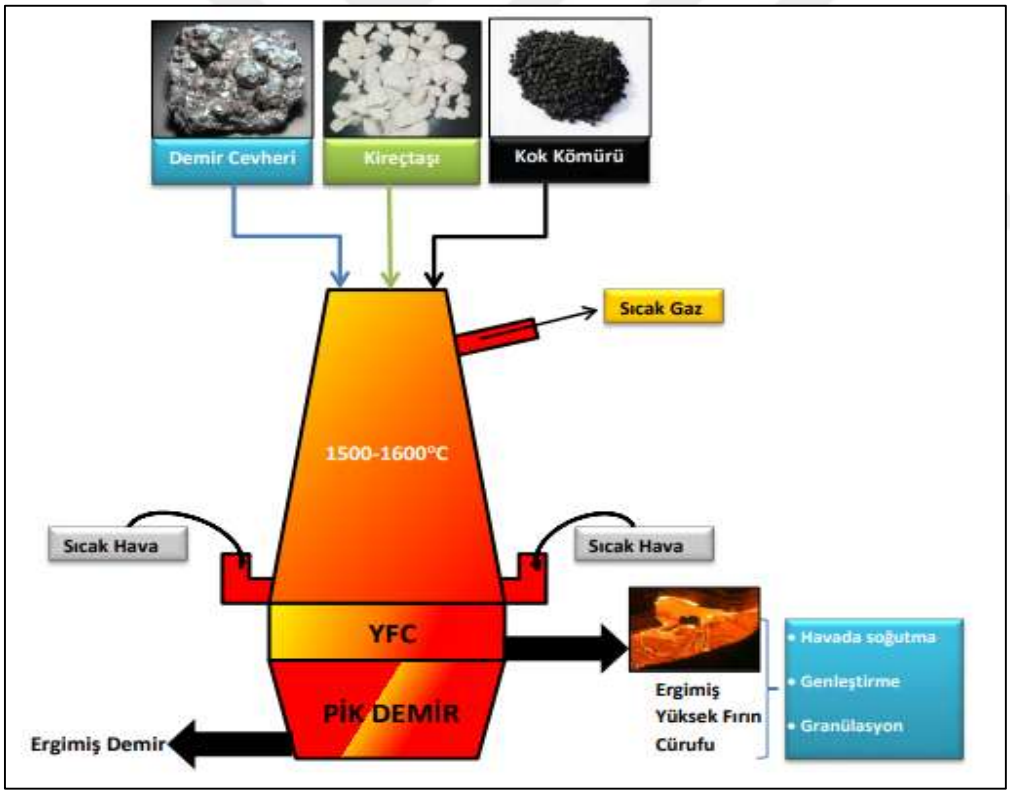
Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özellikleri, 19. yüzyılın ikinci yarısında belirlenmiş ve ticari üretime başlanmıştır. 1883 ve 1893 yıllarında yüksek fırın cürufunun hem Portland çimentosu hammaddesi hem de mineral katkı olarak kullanım potansiyeli tespit edilmiştir. Günümüzde ise dünyanın birçok ülkesinde farklı adlarla yüksek fırın cürufu içeren çimentolar üretilmekte olup, yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çimento ve beton endüstrilerinde cürufların geniş bir kullanım yelpazesi bulunmaktadır.

Geleneksel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar, kristal yapılı kütleler halinde oluşmakta ve genellikle beton agregası ve yol malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, modern çelik üretim tesislerinde camsı yapıya ve belirli hidrolik özelliklere sahip cüruflar elde edilmekte olup bu tür cürufların çimento sistemlerinde kullanımı mümkün hale gelmiştir.

Tüm cüruf türleri arasında yüksek fırın cürufu, en önemli ve en yaygın kullanılandır. Ham demir üretimi sırasında yan ürün olarak oluşan yüksek fırın cürufu, özgül ağırlığının daha düşük olması nedeniyle ham demirin üzerinde birikmektedir. Yüksek fırın cürufu, demir cevherinin yanma süreci sonrasında geriye kalan gang, kok ve kireçtaşı artıklarını içermektedir. Oluşum sıcaklığı 1400-1600 °C arasında değişen yüksek fırın cürufunun üretim süreci, Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmektedir [59].



Şekil 2.8. Yüksek fırın cürufu elde edilmesi [59]

Yüksek fırından çıkan sıvı cüruf, hızla soğutularak kristal oluşumunun engellenmesi sağlanır ve camsı bir yapı meydana gelir. Bu yarı stabil camsı materyal, sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit gibi aktivatörler kullanıldığında hidrolik özellik kazanır. Ayrıca, ince

öğütme işlemi ve Portland çimentosunun hidrasyonundan kaynaklanan $Ca(OH)_2$'nin kullanımı ile aktivasyon gerçekleştirilir. Aktivasyon süreci sonucunda, C-S-H'lar oluşur.

ASTM C 595 "Harmanlanmış Hidrolik Çimentolar için Standart Şartname" ise harmanlanmış çimentolarda kullanılabilecek granüle yüksek fırın cürufuna ilişkin genel gereklilikleri tanımlamaktadır. Bu standarda göre, granüle yüksek fırın cürufunun kullanılabilirliği, belirlenen test yöntemi uygulanarak değerlendirilmekte ve bu değerlendirme, çimento üretiminde cürufun kullanım şekline bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Klinker ve cürufun ayrı ayrı öğütüldüğü durumlarda, yaş eleme yöntemi ile belirlenen 45 μm elek kalıntısının %20'yi aşmaması ve ince cürufun 28 günlük aktivite indeksinin %75'ten yüksek olması gerekmektedir [59].

Bunun yanı sıra, ASTM C 1073 "Öğütülmüş Cürufun Alkali Reaksiyonuna Dayalı Hidrolik Aktivitesinin Belirlenmesi için Test Yöntemi" standardında, hidrolik cürufun 24 saat içinde aktivitesini belirleyen bir test yöntemi bulunmaktadır. Bu yönteme göre, granüle yüksek fırın cürufu ve sodyum hidroksit çözeltisinden oluşan küp numuneler, hızlandırılmış kürleme işlemine tabi tutulduktan sonra basınç dayanımı belirlenmektedir. Beton ve harçta kullanılacak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna yönelik bir diğer standart ise ASTM C 989 "Beton ve Harçlarda Kullanılacak Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu için Şartname"dir. Bu standarda göre, granüle yüksek fırın cürufu 80, 100 ve 120 olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflarda, aktivite indeksleri %50 Portland çimentosu ve %50 cüruf içeren karışımlar kullanılarak belirlenmektedir [59].

Pirinç kabuğu külü

Pirinç, çeltik bitkisinin fabrikalarda işlenmesi sonucu elde edilen bir tahıl ürünüdür. Pirinç taneleri, üzerlerindeki çeltik saplarından ve kabuklardan ayrıştırılarak elde edilmektedir. Pirinç taneleri üzerinde iki farklı kabuk bulunmaktadır. Birinci kabuk, pirinç tanelerini saran, sarımsı renkte ince bir zardır. Bu zar besleyici özelliklere sahip olup bazen pirinç taneleri üzerinde bırakılabilir, ancak genellikle hayvan yemi olarak değerlendirilir. İkinci kabuk ise "kavuz" olarak adlandırılan, pirinç tanelerinin en dış katmanını oluşturan kabuktur. Çeşitli organik ve inorganik bileşenlerden oluşan bu kabuk, yüksek oranda (%92-%93) silika içermektedir. Pirinç üretimi sırasında, her bir ton pirinçten yaklaşık 200 kg (%20) pirinç kabuğu açığa çıkmaktadır. Başta Bangladeş, Çin, Tayland ve Hindistan olmak üzere, dünya

genelindeki yıllık pirinç üretimi yaklaşık 500 milyon ton civarındadır. Bu da her yıl pirinç üretimi sonucunda yaklaşık 100 milyon ton pirinç kabuğunun elde edildiği anlamına gelmektedir [33].

Pirinç kabuklarının yanması sonucu oluşan kül miktarı, kabuk ağırlığının yaklaşık %20'sine kadar ulaşmaktadır. Başka bir deyişle, yıllık 500 milyon tonluk pirinç üretiminden yaklaşık 100 milyon ton pirinç kabuğu elde edilmektedir. Bu 100 milyon ton pirinç kabuğu yakıldığında ise yaklaşık 20 milyon ton pirinç kabuğu külü oluşmaktadır [60].

Pirinç kabuğu külünde %93 oranında silika bulunmasının yanı sıra, çok küçük oranlarda kalsiyum oksit, alümina, magnezyum oksit, demir oksit ve alkali bileşenler de bulunabilmektedir. Yanma işlemi, 400 °C ile 600 °C arasında kontrollü bir şekilde yapıldığında ve külün hızlı bir şekilde soğutulma işlemi gerçekleştirildiğinde, küldeki silika amorf bir yapıya sahip olur. Kül, yüksek miktarda amorf silika içerdiğinden, puzolanik bir malzeme olarak değerlendirilebilir [60].

Pirinç kabuğu külü, çok eski yıllarda kerpiç yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Almanya'da 1924 yılında, pirinç kabuğu külünün beton yapımında kullanımıyla ilgili iki patent alınmıştır. 1950 ile 1960 yılları arasında, Pakistanlı Ahsanullah ve arkadaşları, Portland çimentosu ile %5:1 ila %1:20 arasında değişen çimento/kabuğu külü karışımlarıyla çimentolu bloklar üretmişlerdir [60].

2.7. Beton ve Harçlarda Sülfat Etkisi

Sülfat kaynaklı kimyasal saldırılar, beton ve harçlarda sistemlerinin uzun vadeli dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyen başlıca agresif çevresel bozulma mekanizmalarından biridir. Sülfat içeren su ve zeminlerle temas eden temeller, kıyı ve liman yapıları, iskele elemanları ve boru hatları gibi mühendislik yapılarında, zamanla genleşme, çatlak oluşumu ve malzeme bütünlüğünde zayıflama meydana gelebilmektedir. Magnezyum, sodyum, kalsiyum ve potasyum sülfat gibi iyonlar, killi zeminler, yer altı suları, cüruf dolgulu alanlar ve deniz suyu aracılığıyla beton ve harç bünyesine taşınmakta ve sertleşmiş yapı içerisine nüfuz etmektedir [61].

Sülfat iyonlarının çimentolu bağlayıcı fazlarla reaksiyona girmesi, alçıtaşı ve etrenjit gibi genleşmeye yol açan ürünlerin oluşumuna neden olur. Bu bileşikler, hacim olarak başlangıç maddelerine göre oldukça büyük olduğundan, beton ve harçta genleşme, çatlak oluşumu ve yapısal bozulmalara yol açmaktadır [61,62]. Oluşan etrenjit ve alçıtaşı sonrası açığa çıkan kalsiyum bileşikleri, C-S-H jelinde bozulmalara neden olur; bu durum, jel sertliğinin azalmasına ve çimento hamuru matrisinin zayıflamasına yol açmaktadır [61,63].

Beton ve harcın sülfat saldırılarına karşı gösterdiği direnç, başta çimentodaki serbest kireç ($Ca(OH)_2$), kalsiyum alüminat (C_3A) ve ferroalüminat fazlarının miktarına bağlıdır. Sülfat direncini etkileyen diğer faktörler arasında çimento bileşimi, beton ve harcın geçirimliliği, su/çimento (s/ç) oranı, sülfat tuzlarındaki katyon türleri, sülfat iyonlarının konsantrasyonu, maruz kalma koşulları ve süresi ile yeraltı su seviyesinin durumu ve hareketliliği sayılabilir [63-65].

2.7.1. Dış kaynaklı sülfat saldırısı

Dış kaynaklı sülfat saldırıları, genellikle yüksek konsantrasyonlu sülfat iyonları içeren topraklar, endüstriyel atıklar, deniz suları, yeraltı suları ve nehirler gibi ortamlara maruz kalan betonlarda bozulmalara yol açmaktadır. Bu bozulmada, sülfat iyonlarıyla birlikte bulunan katyon türleri olan Na^+ ve Mg^{++}, betonun zarar görmesinde önemli rol oynamaktadır [66].

Beton bünyesine dışarıdan sülfat nüfuz ettiğinde, sülfat iyonları alçıtaşı, C_3A ve/veya monosülfat ile reaksiyona girerek etrenjit oluşumuna yol açmaktadır (“Eş. 2.4 ve 2.5”) [67].

$$(CaSO_4.2H_2O) + 3CaO.Al_2O_3 + 26H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \quad (2.4)$$

(alçıtaşı) (trikalsiyum alüminat) (su) (etrenjit)

$$(CaSO_4.2H_2O) + 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O + 16H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \quad (2.5)$$

(alçıtaşı) (monosülfat) (su) (etrenjit)

Yeraltı suyu, dış kaynaklı sülfat saldırılarının en yaygın nedenidir. Bunun yanı sıra göl ve nehir suları ile endüstriyel atık suları da önemli sülfat kaynakları arasında yer almaktadır.

Endüstriyel atıklar, genellikle göl ve nehir sularına kıyasla daha yüksek sülfat konsantrasyonuna sahiptir. Ayrıca, sülfat açısından zengin kil, kurak bölge topraklarında bulunan alçıtaşı ve diğer toprak türleri de dış sülfat kaynakları olarak değerlendirilebilir. Yağışlar sayesinde bu bölgelerdeki sülfatlar yüzey ve yeraltı sularına karışarak beton yapılarına nüfuz edebilir. Benzer şekilde, tarımda kullanılan gübrelerin suya karışması da betonlarda sülfat etkisine yol açabilmektedir [68].

Beton içine su içerisinde çözünmüş şekilde giren sülfat iyonlarının etkisi iki şekilde ortaya çıkar. İlk olarak, betonun boşluklarındaki kalsiyum hidroksit ile magnezyum sülfat reaksiyona girerek kalsiyum sülfat oluşumuna yol açar ("Eş. 2.6"). Bu süreçte meydana gelen magnezyum hidroksit, çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle çökelir. Kalsiyum sülfat ise iki mol su bağlayarak kristalleşir ve yaklaşık %15 oranında hacim genleşmesine neden olur [69].

$$Ca(OH)_2 + \quad MgSO_4 \rightarrow \quad CaSO_4 + Mg(OH)_2 \tag{2.6}$$

Sülfatın betona verdiği en kritik zarar, kalsiyum sülfat ile C_3A arasındaki kimyasal etkileşimden kaynaklanmaktadır ("Eş. 2.7"). Bu reaksiyon sonucunda trikalsiyum alüminat (Candlot tuzu) oluşur ve içinde 31 mol kristal su bulunur; bu bileşik mukavemet göstermemektedir. Beton içinde oluşan bu bileşik, yaklaşık %227 oranında hacim artışına neden olarak çatlakların ve parçalanmaların ortaya çıkmasına neden olur [69].

$$3CaO.Al_2O_3.12H_2O + CaSO_4 + 19H_2O \rightarrow \quad 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O \tag{2.7}$$

Sodyum sülfat ile $Ca(OH)_2$ arasındaki reaksiyon sonucunda katı faz yaklaşık %124 oranında hacim artışı göstermektedir("Eş. 2.8"). Sürekli su etkisiyle $Ca(OH)_2$ beton veya harç bünyesinden tamamen uzaklaşabilir. Reaksiyon, NaOH birikimi ile dengeye ulaştığında, yalnızca SO_3'ün bir kısmı alçıtaşına dönüşmektedir [70].

$$Ca(OH)_2 + \quad Na_2SO_4 10H_2O \rightarrow \quad CaSO_4 2H_2O + 2NaOH + 8H_2O \tag{2.8}$$

2.7.2. İç kaynaklı sülfat saldırısı

İç kaynaklı sülfat etkisi, beton ve harçlarda iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Birincisi, normal

sıcaklıktaki betonlarda ve harçlarda gözlenen iç kaynaklı sülfat etkisidir. İkincisi ise buhar kürü veya yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda meydana gelen etkidir. Beton üretimi sırasında su ile çimento ürünlerinin reaksiyonu sonucu çimentodaki alümin bileşenler ve sülfat içeren elemanlar arasındaki etkileşim, birincil etrenjit oluşumuna yol açabilmektedir. Ayrıca, çimentodaki fazla Al_2O_3 ve SO_3 uygun koşullar altında, sertleşmiş betonun çimento hamuru ve agrega arayüzeyinde kimyasal reaksiyonlara girerek etrenjit üretimine katkı sağlar. Çimento ile birlikte beton içine giren sülfatlar, alit (C_3A ve CA) ve ferit (C_4AF) fazları ile reaksiyona girerek tüketilmektedir [68].

Buhar kürü veya yüksek sıcaklığa maruz bırakılan betonlarda ise iç kaynaklı sülfat etkisi farklı şekilde kendini gösterir. Bu durum, betonun hidratasyonu sırasında oluşan yüksek sıcaklık veya üretim sürecindeki çevresel sıcaklıktan kaynaklanabilir. Yüksek sıcaklıkta kürlenen betonlar, sonrasında nemli bir ortamda bulunduklarında, bünyedeki sülfattan dolayı etrenjit oluşumuna maruz kalırlar. Bu olaya literatürde "gecikmiş etrenjit oluşumu" da denilmektedir [68].

2.8. Beton ve Harçlarda Deniz Suyu Etkisi

Deniz suları, farklı tür ve miktarlarda tuz içermektedir ve bu tuzlar sertleşmiş beton ve harç içerisine nüfuz ederek çeşitli olumsuz etkiler yaratmaktadır. Deniz suyunda bulunan sülfatlar, beton ve harçta kimyasal reaksiyonlara yol açar; bu reaksiyonlar, toprak ve yeraltı suyundaki sülfatların etkisi kadar şiddetli olmasa da malzeme üzerinde genleşme ve çatlak oluşumuna neden olabilir. Deniz suyundaki klorür iyonları, sülfat reaksiyonları sırasında oluşan alçıtaşı ve etrenjitin bir kısmının çözünerek yüzeye taşınmasına katkıda bulunur; bu durum, malzemedeki genleşme etkilerini bir miktar azaltır. Bununla birlikte, sülfat ve tuz kristallerinin gözeneklerde birikmesi, basınç oluşturarak beton ve harçta mikro çatlaklara ve sınırlı yüzey deformasyonlarına yol açabilir. Bu etki, özellikle beton yüzeyinin su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde daha belirgindir ve gel-git hareketiyle tekrarlanan ıslanma-kuruma döngüleri sonucu hasar artar [70].

Ayrıca, deniz suyunda bulunan magnezyum sülfat, beton ve harçtaki C-S-H jelinde yavaş ilerleyen çözünmelere sebep olur. Gözeneklerde biriken kristaller, kısmen su girişini engelleyerek ilerleyen bozulmaları yavaşlatır. Bu nedenle, deniz suyuna maruz beton ve harçlarda s/ç oranının 0.45'i geçmemesi önerilmektedir; ince kesitli betonlarda veya donatı

pas payının düşük olduğu durumlarda ise bu oran 0.40'ı aşmamalıdır. Bu önlemler, deniz suyuna maruz beton ve harçların yapısal bütünlüğünü kısmen korumaya yardımcı olur [70].

2.9. Beton ve Harçta Tuzun Etkisi

Betonun gözeneklerine çözünmüş tuzların girmesi ve bunun ıslanma-kuruma döngüleriyle tekrarlanması, zamanla gözeneklerdeki tuz derişiminin artmasına yol açmaktadır. Tuz konsantrasyonunun yaklaşık %4–5 düzeylerine ulaşması durumunda, kristalleşme süreçleri belirgin hâle gelmektedir. Tuzlu suyun beton içerisinde ilerlemesiyle, bu tuzlar gözeneklerde katı kristaller hâline geçerek hacim artışı oluşturabilir ve bu durum don etkisine benzer şekilde genleşmeye neden olabilir. Özellikle kristal suyu içeren tuzların molar hacmi, çözelti hâlindeki hacimlerinden belirgin ölçüde daha büyük olduğundan, oluşan kristallenme beton içinde ilave içsel basınç yaratmaktadır. Beton içerisine taşınan tuzların yol açtığı temel olumsuz etkiler aşağıdaki şekilde özetlenebilir [69]:

1. Beton ve harç bünyesine taşınan tuzlar (özellikle $CaCl_2$ ve NaCl) higroskopik özellikleri nedeniyle yapının su tutma kapasitesini artırır ve betonun doygunluk derecesini yükseltir.
2. Gözenekler içinde biriken tuzların yoğunluğu her bölgede aynı değildir; yer yer değişen konsantrasyonlar oluşur. Bu durum, kapiler kanallarda ortaya çıkan osmotik basıncın artmasına yol açar.
3. Beton ve harç içerisindeki suyun bir bölümünün uzaklaşmasıyla tuz çözeltileri doygunluğa ulaşır ve boşluklarda kristal yapılar oluşmaya başlar.

2.10. Zeolit ile Yapılan Önceki Deneysel Çalışmalar

Küçükyıldırım ve Uzal (2014), yüksek performanslı puzolan katkılı çimentolarda, 200 °C, 400 °C ve 600 °C'de 2 saat boyunca kalsine edilen zeolitlerin kullanımını incelemiştir. Çalışmalarında, kalsine edilmiş zeolitlerin, ham zeolite kıyasla daha düşük su ihtiyacına sahip olduğunu ve daha yüksek basınç dayanımı performansı sergilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, gözenekliliği azalan çimento sistemlerinin, daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [71].

Burris ve Juenger (2020), 300 °C ile 965 °C arasında kalsinasyona tabi tutulan farklı doğal klinoptilolit zeolitlerinin faz içeriği, partikül boyutu, yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımındaki değişiklikleri incelemiştir. Çalışmalarında, kalsinasyon işleminin zeolitin partikül boyutunu ve amorf içeriğini artırırken, gözeneklilik ve yüzey alanını azalttığını ortaya koymuşlardır [72].

Dayı ve arkadaşları (2013), farklı oranlarda uçucu kül, zeolit, atık cam ve Portland çimentosu klinkerinin birleştirilmesiyle üretilen kompozit çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiş ve bu malzemelerin kompozit çimento üretiminde kullanım potansiyelini araştırmışlartır. Elde edilen deneysel sonuçlar, üretilen çimentoların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ilgili standartlara uygun olduğunu göstermiştir. Çalışmada, %10 oranında zeolit ikamesinin Portland kompozit çimento üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [73].

Yazıcıoğlu (2016), Manisa (Gördes) ve Ordu (Perşembe) bölgelerinden temin edilen doğal zeolit minerallerinden analsim ve klinoptilolitin harç ve beton numunelerinde katkı malzemesi olarak kullanımını incelemiştir. Çalışmada, her iki zeolit türü %0, %10, %30 ve %50 oranlarında ikame edilerek hazırlanan 14 adet deney serisi üzerinde basınç dayanımı ile dayanıklılığa yönelik standart testler uygulanmıştır. Sonuçlar, hem klinoptilolit hem de analsimin, çimento ve beton üretimlerinde yaklaşık %30 oranına kadar puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, analsimin, inşaat sektöründe daha yaygın kullanılan klinoptilolite alternatif bir mineral olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir [74].

Poon ve arkadaşları (1999), s/ç oranını 0,25 ve 0,30 olarak belirleyerek, zeoliti %15 ve %25 oranlarında ikame ettikleri 7 cm^3 boyutundaki harç numunelerinin 3, 7, 28, 90 ve 180. günlerdeki basınç dayanımı ve porozite değerlerini incelemişlerdir. Deney sonuçları, düşük s/ç oranına sahip numunelerde daha yüksek dayanım elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, %15 zeolit ikamesinin poroziteyi azalttığı, buna karşın %25 zeolit ikamesinin tüm test günlerinde poroziteyi artırdığı tespit etmişlerdir [75].

Uzal (2007), Türkiye'nin Bigadiç ve Gördes bölgelerinden temin edilen doğal klinoptilolit zeolitlerinin puzolanik özelliklerini ve bu zeolitlerin %15, %35 ve %55 oranlarında ikame edilerek hazırlanan harç ve betonların performansını incelemiştir. Zeolit kullanımının,

betonun klor iyon geçirgenliğini azalttığı ve böylece geçirimsiz beton elde edilmesinde avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Bigadiç ve Gördes zeolitleri, mühendislik özellikleri açısından farklı performanslar sergilemiş, ancak her iki zeolit de genel olarak olumlu sonuçlar ortaya koymuştur [76].

Dığış (2016), Türkiye'deki aktif üreticilerden granüler doğal zeolit örnekleri temin ederek, bu örneklerle detaylı harç deneyleri gerçekleştirmiştir. Farklı oranlarda öğütülmüş doğal zeolitin harç karışımlarında ikame edilerek yapılan çalışmada, sülfat direnci, klor iyonu penetrasyonu direnci, alkali-silika reaksiyonu, eğilme ve basınç dayanımı gelişimi ile su emme performansları, referans bileşimli harçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, durabilite performansında belirgin bir iyileşme sağlandığını göstermektedir [77].

Chen ve çalışma arkadaşları (2018), Çin'in Henan bölgesinden elde edilen zeoliti kullanarak gerçekleştirdikleri araştırmada, %5 oranına kadar yapılan zeolit ikamesinin harçların yoğunluğu ile akışkanlık özelliklerini iyileştirdiğini ve bu durumun mekanik performansı olumlu etkilediğini raporlamışlardır. Bu çalışmada, CEM I 42,5 N tipi Portland çimentosu kullanılarak, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ince öğütülmüş zeolit ilavesiyle farklı su/bağlayıcı ve bağlayıcı/agrega oranlarına sahip küp numuneler üretilmiştir. Araştırma bulgularına göre, bağlayıcı/agrega oranının 0,75 yerine 0,65 veya 0,55 olarak seçilmesi durumunda, 60 MPa'dan düşük basınç dayanımlarında çimentonun yaklaşık %10 oranında azaltılabileceği ifade edilmiştir [78].

Durgun (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, beton karışımlarına %20 oranında zeolit ve diatomit ikame edilerek hazırlanan numunelerde, donatılı betonun HCl ve H_2SO_4 çözeltilerindeki korozyon davranışı değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, %20 zeolit içeren numunelerde hem betonun hem de donatının, kontrol grubuna ve %20 diatomit içeren numunelere kıyasla daha yüksek direnç gösterdiğini ve böylece asidik ortamlarda daha az korozyona maruz kaldığını ortaya koymuştur [79].

Özen (2013) tarafından yürütülen çalışmada, analsim, mordenit ve klinoptilolit tipi zeolitlerin farklı oranlarda ikame edilmesiyle elde edilen harçların performansı değerlendirilmiştir. Basınç dayanımı testlerinin sonuçlarına göre, özellikle Bigadiç bölgesine ait klinoptilolit zeolitinin kullanıldığı numunelerin 28 günlük dayanım

değerlerinin, kontrol grubundaki numunelere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [80].

Özer (2018), geopolimer harçların taze haldeki reolojik özellikleri üzerine zeolit katkısının etkisini incelemiştir. Çalışmada, bağlayıcı olarak doğal zeolit ile sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörü kullanılarak geopolimer yapılar oluşturulmuş ve CEM I 42,5 N Portland çimentosu yerine artan oranlarda (%0'dan %100'e kadar) zeolit ikame edilmiştir. Taze karışımların viskozite değerleri viskozimetre ile belirlenmiş ve zeolit oranı arttıkça viskozitenin genellikle yükseldiği gözlenmiştir. Ayrıca, agrega/bağlayıcı oranındaki artışın basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, %10 zeolit içeren ve agrega/bağlayıcı oranı 1,75 olan harçların en yüksek basınç dayanımına (78,5 MPa) ulaştığı tespit edilmiştir. Zeolit miktarındaki artış aynı zamanda birim hacim ağırlıkta düşüşe neden olmuştur [81].

Markiv ve çalışma arkadaşları (2016), Ukrayna'nın Sokyrntisa bölgesinden elde edilen, %75 oranında SiO_2 ve yaklaşık %60 klinoptilolit içeren doğal zeolitin betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada, %10 oranında zeolit katkısı içeren karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlar, zeolit içermeyen referans örneklerle karşılaştırılmıştır. Karışımlarda 0–2 mm ince agrega, 2–8 mm ve 8–16 mm boyutlarında kaba agrega kullanılmış; CEM I 42,5 R tipi çimento 350 kg/m³ oranında ve s/ç oranı ise 0,50 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Ek olarak, %1,2–1,6 oranlarında hava sürükleyici katkı ve %4–5,1 oranlarında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Zeolitin yüksek özgül yüzeyi nedeniyle hedeflenen yayılma değerine ulaşabilmek için daha fazla süper akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duyulmuştur. Numunelere 1, 28, 56, 90 ve 180. günlerde uygulanan testler sonucunda, zeolit katkılı betonların 90. güne kadar nispeten düşük basınç dayanımları sergilediği, ancak 180. gün itibarıyla daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkıların donma-çözülme direnci, büzülme davranışı ve su emme kapasitesi üzerinde olumlu etkiler sağladığı gözlemlenmiştir [82].

Tydlitat ve çalışma arkadaşları (2014), izotermal kalorimetre kullanarak, kütlece %40'a kadar doğal zeolit içeren çimentolu sistemlerin erken hidratasyon ısısını incelemişlerdir. Slovakya'nın Nizny Hraboves maden sahasından elde edilen zeolitin %84 oranında klinoptilolit ve %74,7 oranında SiO_2 içerdiği; BET yüzey alanının 30.665 m²/kg, Blaine

inceliğinin ise 852 m²/kg olduğu belirtilmiştir. Yapılan analizler, zeolit katkısının C_3S hidratasyonunu hızlandırdığını ve C_3A fazının ilk hidratasyon evresini desteklediğini göstermiştir. Zeolit oranının artmasıyla birlikte, C_3A fazının ikinci hidratasyon evresi daha belirgin hale gelmiştir. Özellikle %30 ve üzeri zeolit içeren karışımlarda, bu faza ait maksimum özgül hidratasyon ısısının, C_3S fazından kaynaklanan ısıdan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel veriler doğrultusunda, zeolitin hidratasyon üzerindeki etkisinin ikame oranı arttıkça azaldığı, dolayısıyla optimum katkı miktarının %10 olduğu ifade edilmiştir. %10'un üzerindeki oranlarda zeolitin bir kısmının aktif hidratasyona katılmadığı, bunun yerine dolgu (filler) işlevi gördüğü sonucuna ulaşılmıştır [83].

Yılmaz (2018) tarafından yürütülen çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve doğal zeolit katkılarının kendiliğinden yerleşen betonların taze ve sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, yüksek fırın cürufu içeren karışımlar en iyi işlenebilirlik ve mekanik performansı sergilemiştir. Uçucu kül katkısı da reolojik özellikleri iyileştirerek olumlu sonuçlar vermiştir. Ancak zeolitin %30, %40 ve %50 oranlarında çimento yerine kullanılması, karışımların su ihtiyacını önemli ölçüde artırmış ve yayılma kabiliyetini düşürmüştür. Bu nedenle, zeolit katkılı karışımlar taze beton testlerinde yetersiz performans göstermiş ve kendiliğinden yerleşen beton kriterlerini karşılayamamıştır. Ayrıca, bu karışımların basınç dayanımı değerlerinin diğer katkı türlerine kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir [84].

Ahmadi ve çalışma arkadaşları (2009), İran'ın Semnan bölgesinden elde edilen doğal zeolitin beton karışımlarında kullanımını incelemişlerdir. Yapılan deneylerde, zeolitin betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerinde olumlu etkiler sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen veriler, benzer şekilde farklı mineral katkılarla hazırlanmış beton karışımları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Aras Barajı projesi kapsamında Aras Nehri'nden temin edilen agregalarla yapılan alkali-silika reaksiyonu testlerinde, %20 ila %40 oranlarında kullanılan zeolit ve uçucu kül katkılarının bu zararlı reaksiyonun önlenmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir [85].

Öcal (2014) tarafından yürütülen çalışmada, doğal zeolit katkısının betonun yüksek sıcaklık koşullarındaki performansına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, %5'ten %40'a kadar değişen oranlarda doğal zeolit ile hazırlanan beton karışımları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, zeolit katkısının yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanımına olumlu

etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, zeolit oranındaki artışla birlikte, beton agregalarının yüksek sıcaklıktan kaynaklanan hasarlara karşı direncinin arttığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, zeolit katkısının betonun ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü ve böylece termal yalıtım performansına katkı sağladığı tespit edilmiştir [86].

Savaş (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, %0, %10 ve %20 oranlarında zeolit; %10 ve %20 oranlarında diatomit; ayrıca %5+5 ve %10+10 oranlarında zeolit-diatomit karışımlarını içeren toplam yedi farklı çimento karışımı ile beton örnekleri hazırlanmıştır. Bu örnekler üzerinde basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler, hem zeolit hem de diatomit katkılarının, betonun mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [87].

Yıldız ve arkadaşları (2014), magnezyum sülfat ($MgSO_4$) etkisi altındaki yol kaplamalarında, çimento yerine pomza ve zeolit kullanılarak hazırlanan betonların performansını değerlendirmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, bu iki mineral katkının betonun sülfat direncini artırabileceğini ve rijit yol kaplamalarında alternatif bağlayıcı malzemeler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur [88].

Ceylan (2021) yapmış olduğu çalışmada, mikron boyutuna kadar öğütülmüş doğal zeolitin çimentoya kısmen ikame edilerek elde edilen harç ve betonların mühendislik özellikleri değerlendirilmiştir. Deneylerde, sabit %10 oranında silis dumanına ek olarak %5, %10, %15 ve %20 oranlarında mikronize zeolit kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, %15 zeolit ikamesinin %10 silis dumanı kullanılan karışımlarla benzer performans özellikleri sergilediğini ortaya koymuştur [22].

Jo ve diğer çalışma arkadaşları (2012), Güney Kore, Kuzey Gyeongsang bölgesinden elde edilen zeolitin, alkali aktivatör ve quartz ile birlikte kullanıldığı harç karışıımları üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, 5 cm^3 hacmindeki harç numuneleri kullanılarak basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, zeolit çimentosu ile hazırlanan karışımlar 7 gün içerisinde 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %90'ına ulaşmıştır. Ayrıca, 7 günlük basınç dayanımı değerinin 43,5 MPa seviyesine çıktığı tespit edilmiştir [89].

Feng ve diğerleri (1990), çimentoya ikame olarak %10 oranında zeolit ve karışımın %31-35'lik kısmında akışkanlaştırıcı kullanılarak yüksek dayanımlı beton üretimini incelemişlerdir. Bu karışımla elde edilen betonun, 80 MPa basınç dayanımına ve 18 cm çökme değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu dayanımın, yalnızca Portland çimentosu kullanılan betonların dayanımından %10-15 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, geleneksel betonlarda görülen terleme ve ayrışmanın bu tür karışımlarda gözlemlenmediği ifade edilmiştir. Zeolit katkısının çimento hamuru fazında iyileşmelere yol açtığı ve bu durumun betonun geçirgenlik özelliklerini olumlu etkileyebileceği sonucuna varmışlardır [90].

Canpolat ve Yılmaz (2002), puzolanik özellik taşıyan doğal zeolit ve uçucu kül katkılarının, harçların sülfat etkisine karşı dayanıklılığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, %5 ve %10 oranlarında sodyum sülfat çözeltileri hazırlanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Harç numuneleri; çimento kütlesinin %20 ve %30'u oranında zeolit ikame edilerek, ayrıca %15 zeolit + %5 uçucu kül ve %25 zeolit + %5 uçucu kül içerecek şekilde hazırlanmıştır. Tüm numuneler, 28 günlük kür süresi boyunca kirece doygun suda bekletilmiştir. Deneysel testler 2, 7, 28 ve 90. günlerde yapılmış; eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yüksek sülfat konsantrasyonlarının bulunduğu ortamlarda dahi zeolit katkısının harcın sülfata karşı dayanıklılığını artırdığını ortaya koymuştur [91].

Najimi ve diğerleri (2012), yüksek reaktif özelliklere sahip doğal zeolit katkılı beton numunelerin mekanik ve dayanıklılık performanslarını belirlemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, %15 ile %30 arasında değişen oranlarda doğal zeolit ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Geleneksel betonlarla yapılan karşılaştırmalar sonucunda, %15 zeolit ikameli beton numunelerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde (su geçirimliliği, kuruma rötresi, klor iyon geçirgenliği, korozyon oranı) iyileşmeler gözlemlenmiştir [92].

Sevim ve Okumuş (2011), silika dumanı ve doğal zeolitin betonun geçirimlilik ile dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan doğal zeolit Manisa-Gördes bölgesinden temin edilmiştir. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,4 olarak belirlenmiş, silika dumanı %8 sabit ikame oranında, doğal zeolit ise çimentoya ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Elde edilen numunelerin basınç dayanımı, yarmada

çekme dayanımı, kılcallık katsayıları ve su emme oranları 28. günde değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, %20 oranında doğal zeolit ikamesinin mineral katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, %10 ve %20 doğal zeolit içeren karışımların, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanım ve daha düşük su geçirgenliği sağladığı tespit edilmiştir [7].

Güldaş (2018) tarafından yürütülen çalışmada, betonun antibakteriyel özellikler kazanması hedeflenmiş ve bu amaçla anataz kristal yapısına sahip titanyum dioksit (TiO_2) tozu, gümüş, zeolit iyonları içeren antimikrobiyal sıvı ile toz formdaki antimikrobiyal katkılar farklı oranlarda beton karışımlarına eklenmiştir. Araştırmada hem gri hem de beyaz çimento kullanılmış; doğal zeolit, %0, %10 ve %20 oranlarında çimentoya ikame edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, zeolit ve TiO_2 katkılarının betonun hem renk tonunun açılmasında hem de antibakteriyel performansın artırılmasında etkili olduğunu ortaya koymuştur [93].

Khoshroo ve arkadaşları (2018), İran'ın Semnan bölgesinden elde edilen ve %69,28 oranında SiO_2 içeren doğal zeolitin, deniz suyu kaynaklı klor iyonlarının beton üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Araştırmada s/ç oranı 0,45 olarak sabit tutulmuş; beton karışımlarına %10 ve %15 zeolitin yanı sıra, %50 ve %100 oranlarında mikro-nano kabarcıklı su ilave edilmiştir. Elde edilen veriler, %15 zeolit ve %100 mikro-nano su ikamesiyle hazırlanan karışımda, 28 günlük basınç dayanımının %45, yarmada çekme dayanımının %78 ve elektriksel direncin %254 oranında arttığını göstermiştir. Buna karşın, klor iyonu geçirgenliği %83, su emme oranı ise %49 oranında azalmıştır. Ayrıca, standart ve klor iyonu içeren kürleme ortamlarında bekletilen numuneler üzerinde yapılan SEM ve XRD analizleri sonucunda, klor etkisinde kürlenen zeolit katkılı betonlarda daha az çatlak oluştuğu tespit edilmiştir [94].

Chen ve çalışma arkadaşları (2017), Çin-Henan bölgesinden elde edilen zeolitin çimento yerine ikame edildiği farklı hamur karışımları hazırlayarak bu katkının çimento hamurlarının reolojik ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zeolit içeren, s/ç oranı 0,45 ile 0,70 arasında değişen toplam 30 farklı 7 cm^3'lük karışım üretilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde 7, 28 ve 70 günlük basınç dayanımı testlerinin yanı sıra akışkanlık ve kohezyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, %20 oranındaki zeolit ilavesinin erken yaşlardaki dayanımı azaltığını, ancak ilerleyen kür sürelerinde dayanım gelişimini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir [95].

Karakurt (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, volkanik tüf ve zeolitlerin çimentoda puzolanik katkı olarak kullanım potansiyeli değerlendirilmiş ve bu kapsamda klinkerin yerine %10, %20, %30, %40 ve %45 oranlarında 5 farklı katkı oranı kullanılarak, alçıtaşı ile birlikte toplam 60 farklı katkılı çimento formülasyonu üretilmiştir. Hazırlanan harç numuneleri üzerinde 2, 7, 28 ve 180 günlük mekanik özellikler test edilmiştir. Ayrıca, katkılı çimentolarla üretilen beton ve harç numuneleri üzerinde alkali-silika reaksiyonu, sülfat etkisi, yüksek sıcaklık dayanımı, donma-çözülme direnci ve hızlandırılmış donatı korozyonu gibi dayanıklılık testleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, katkı malzemesi kullanımının, özellikle uzun vadeli mekanik dayanım ve dayanıklılık performansı üzerinde olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur [96].

Yıldırım (2007) yaptığı çalışmada, Manisa'nın Gördes bölgesinden temin ettiği zeoliti, çimentoya %15 ve %30 oranlarında ikame ederek harç numuneleri üretmiş ve bu numunelerin mekanik özelliklerini ile mikroyapısındaki değişimleri su ve $MgSO_4$ ortamında kür uygulayarak incelemiştir. Araştırma sonucunda, %15 oranında zeolit ikamesi ile olumlu sonuçlar elde edilmiştir [97].

Bilim (2018), yüksek sıcaklıkların etkisi altında doğal zeolit içeren harçların eğilme ve basınç dayanımlarına sodyum karbonat (Na_2CO_3) ilavesinin etkilerini incelemiştir. Çalışmada, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zeolit ikamesiyle hazırlanan harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık (300°C, 600°C ve 900°C) deneyleri sonucunda, zeolit katkılı harçların normal Portland çimentosuna kıyasla daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, aktivatör olarak kullanılan Na_2CO_3'un, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında eğilme ve basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dayanım açısından en başarılı sonuçlar, %10 oranında zeolit ikamesi yapılan karışımlarda elde edilmiştir [98].

Nas (2015) tarafından yürütülen çalışmada, betonun dayanıklılık özellikleri üzerine metakaolin ve zeolit katkılarının etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla, çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda metakaolin (%5, %10, %20) ve zeolit (%10, %15, %20) ikame edilerek üretilen beton numuneleri üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, yüksek sıcaklık direnci, donma-çözülme dayanıklılığı, aşınma direnci, hızlı klor iyon geçirimliliği ve kılcal su geçirimliliği gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler, her iki puzolanın da özellikle mekanik dayanımlar, don karşı dayanıklılık, kılcallık ve klor iyonlarına karşı

geçirimsizlik gibi kriterlerde olumlu katkılar sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık koşullarına ve aşınmaya karşı dayanıklılıkta belirli düzeyde olumsuz etkiler gözlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, optimum katkı oranları metakaolin için %10, zeolit için ise %20 olarak belirlenmiştir [99].

Ranjbar ve arkadaşları (2013), İran'ın Semnan bölgesinden elde edilen doğal zeoliti kullanarak gerçekleştirdikleri araştırmada, kendiliğinden yerleşen betonun hem taze hem de sertleşmiş özelliklerini incelemişlerdir. Bu doğrultuda, zeolit %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimentoya ikame edilerek ve çeşitli su/bağlayıcı oranlarıyla karışımlar hazırlanmıştır. Taze beton davranışı; yayılma, L kutusu ve V hunisi testleriyle değerlendirilmiştir. Sertleşmiş beton performansı ise basınç ve yarmada çekme dayanımı, ultrasonik darbe hızı ve su emme testleriyle analiz edilmiştir. Sonuçlar, doğal zeolit katkısının taze betonun akıcılık ve viskozite özelliklerini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, mekanik dayanım üzerinde gözlemlenen etkilerin büyük ölçüde su/bağlayıcı oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, slump akış değeri 55 cm'yi aşan karışımlarda basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Ultrasonik darbe hızı verileri ise, yüksek dayanımlı karışımlarda zeolitin etkisinin sınırlı düzeyde kaldığını göstermiştir. Ek olarak, doğal zeolit ilavesi yapılan karışımların su emme oranlarında zamanla belirgin bir azalma meydana geldiği saptanmıştır [100].

Mola Abasi ve Shooshpasha (2016), İran'ın Semnan bölgesinden temin edilen klinoptilolit tipi doğal zeoliti, zemin iyileştirmeye yönelik çimentolu kum karışımlarında katkı malzemesi olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında çimento içeren karışımlar hazırlanmış; çimentonun yerini alacak şekilde %10, %30, %50, %70 ve %90 oranlarında zeolit ikamesi gerçekleştirilmiştir. Hazar Denizi kıyısından temin edilen zemin malzemesi ile 38 mm çapında ve 76 mm boyunda silindirik numuneler üretilmiş ve üzerinde sıkıştırılmamış basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, %30 zeolit oranına kadar yapılan ikamelerde dayanım değerlerinde %20 ila %78 arasında artışlar kaydedilmiştir. Ancak ikame oranı bu seviyenin üzerine çıktığında, dayanımın azaldığı tespit edilmiştir [101].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Laboratuvar ortamında hazırlanan deney numuneleri için kullanılan çimento, zeolit, kum, su ve akışkanlaştırıcı hakkında bilgiler başlıklar altında verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Tüm deney numunelerinde TS EN 197-1 [21] standardına uygun olan CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento örneğinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çimentonun priz başlangıç süresi 165 dakika, priz bitiş süresi ise 280 dakika olarak belirlenmiştir.

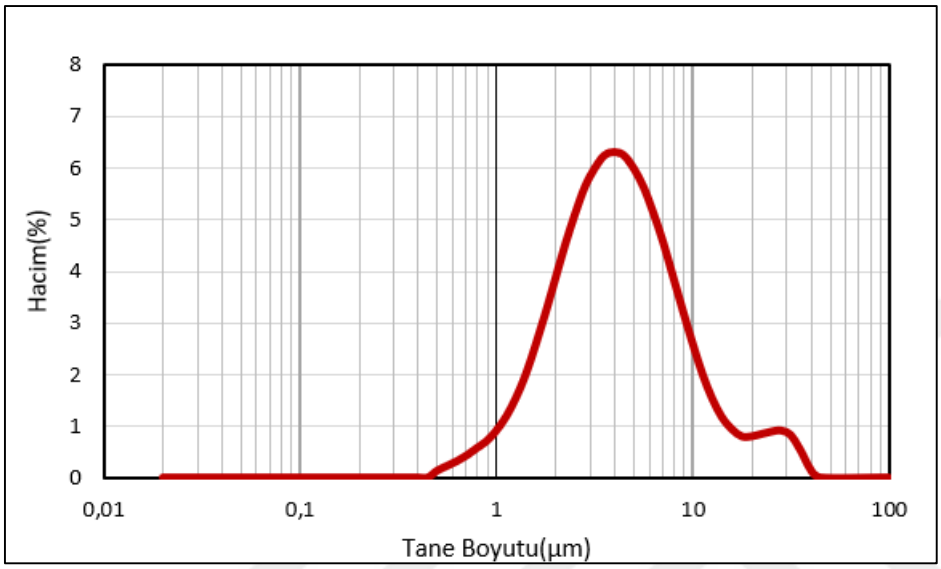
Çizelge 3.1. Çimentonun özellikleri

Oksit	(%)
SiO_2	19,05
CaO	60,91
Al_2O_3	5,31
Fe_2O_3	3,08
SO_3	3,56
MgO	2,15
K_2O	1,35
Na_2O	0,87
Kızdırma Kaybı	3,70
Yoğunluk (g/cm^3)	3,11
Blaine değeri (cm^2/g)	3640

3.1.2. Zeolit

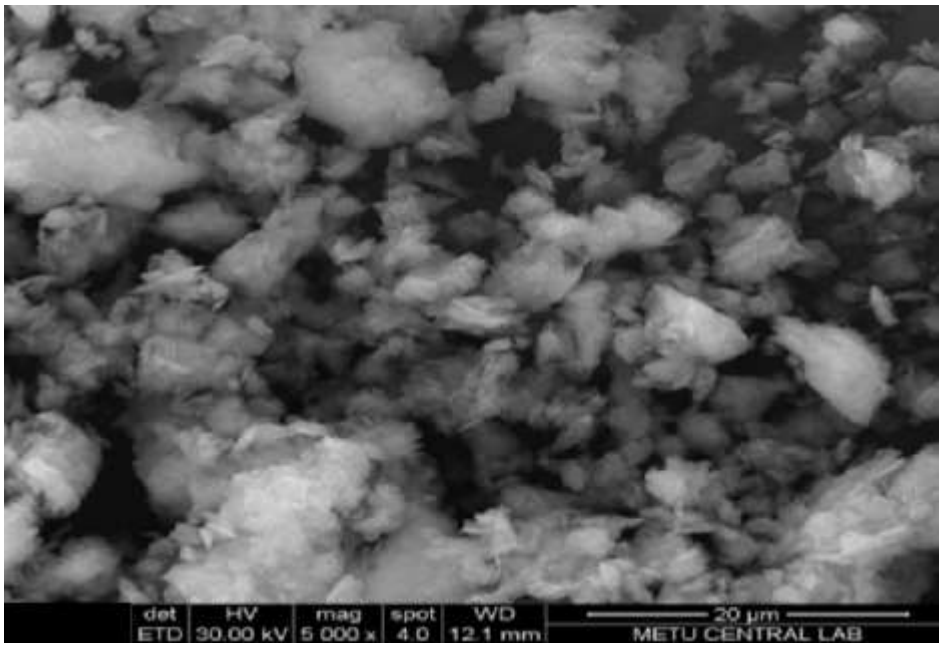
Deneylerde kullanılan zeolit, Manisa'nın Gördes ilçesinden temin edilen klinoptilolit türündedir. Mikronize zeolitin lazer parçacık boyut dağılımı, Mastersizer cihazı kullanılarak belirlenmiş ve Şekil 3.1'de verilmiştir. Klinoptilolit türüne ait SEM görüntüsü Şekil 3.2'de

verilmiştir. Klinoptilolit zeolitinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilirken, doğal ve kalsine edilmiş zeolitlere ait görseller Şekil 3.3'de yer almaktadır. Ayrıca mikronize zeolit 1 saat süreyle kül fırınında 600°C, 700°C ve 800°C kalsine edilerek deney numunelerinde kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Zeolit lazer parçacık boyut dağılımı

Yapılan lazer tane boyutu analizine göre, mikronize edilen zeolit örneğinin %86,25'lik kısmının 10 mikronun altında bir büyüklüğe sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Zeolit(klinoptilolit) SEM görüntüsü [22]

Zeolitin 5000 büyütmede elde edilen SEM görüntüsünde, yüzey morfolojisinin düzensiz belirgin gözenekler içerdiği görülmektedir.

Çizelge 3.2. Zeolitin özellikleri

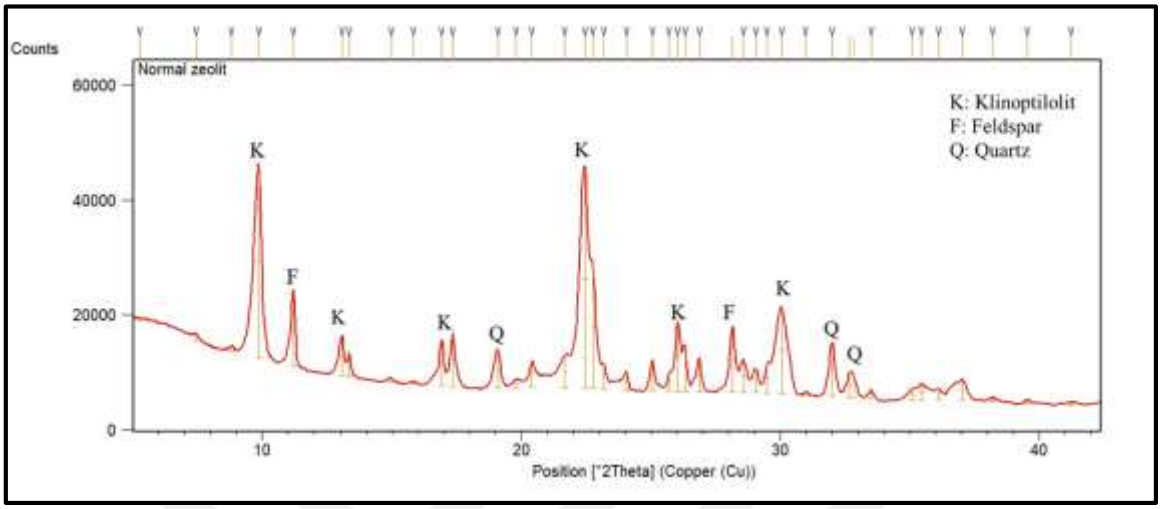
Oksit	(%)
SiO_2	70
CaO	3,44
Al_2O_3	8,64
Fe_2O_3	2,14
MgO	1,2
SO_3	1,2
Na_2O	1,14
K_2O	2,04
Kızdırma Kaybı	9-14
Yoğunluk (g/cm^3)	2,3
BET metodu(İncelik) (cm^2/g)	19340



Şekil 3.3. Harç numunelerinde kullanılan doğal ve kalsine zeolit

Doğal zeolitin mineralojik bileşimini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen XRD analizi, numunenin ağırlıklı olarak klinoptilolit fazından oluştuğunu ve belirli oranlarda kuvars ile feldspat içerdiğini ortaya koymuştur. X-ışını kırınım deseninde 2θ = 9,84°, 22,44°, 26,06° ve 30,07° açılarında gözlenen keskin ve belirgin zirveler, klinoptilolitin yüksek kristalin yapısını doğrulamaktadır. Elde edilen XRD verileri, doğal zeolitin mineral faz dağılımını ve

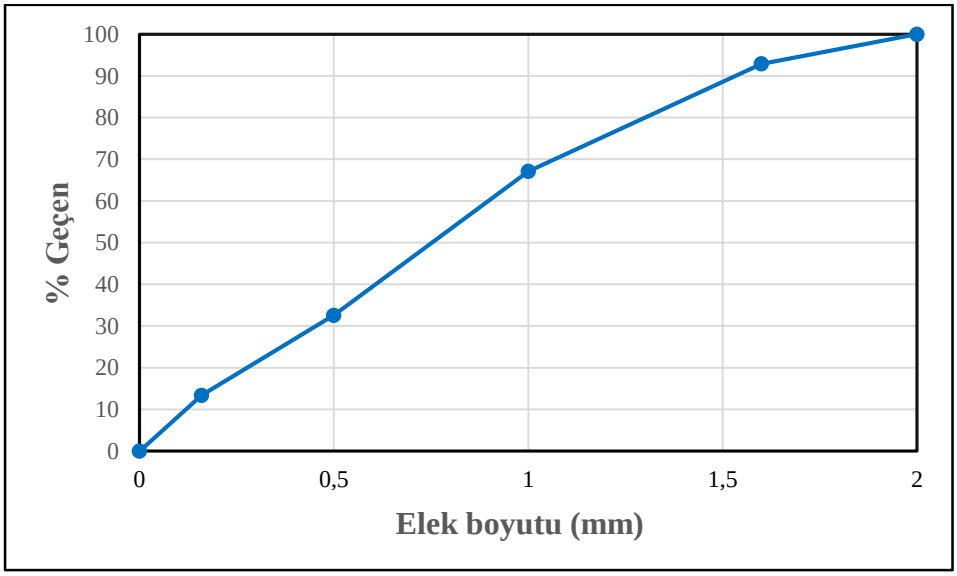
kristal yapısının belirginliğini ortaya koymaktadır. Doğal zeolitin XRD analizi sonuçları Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Numunelerde kullanılan zeolitin XRD grafiği

3.1.3. Kum

Tüm harç numunelerinde ince agrega olarak standart CEN kumu kullanılmıştır [21]. Deney numunelerinde kullanılan CEN kumunun gradasyon grafiği Şekil 3.5'de sunulmuştur.



Şekil 3.5. CEN kumu gradasyon eğrisi

TS EN 197-1 standardında belirtilen CEN kumuna ait gradasyon özellikleri Çizelge 3.3' te sunulmuştur [21].

Çizelge 3.3. CEN standart kumu tane dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2	0
1,6	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

3.1.4. Süper Akışkanlaştırıcı

Zeolit ilavesinden kaynaklanabilecek olumsuz kıvam etkilerini gidermek ve işlenebilirliği sağlamak amacıyla, harç karışımlarına bağlayıcı ağırlığının %0,8 ile %1,5'i arasında değişen oranlarda süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sodyum naftalin sülfonat esaslı sıvı süper akışkanlaştırıcıya ait kimyasal özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Süper akışkanlaştırıcı özellikleri

Özellik	Değer
Özgül Ağırlık	1,20 gr/cm³ ± 0,05
Sodyum Sülfat İçeriği	0,50%
Katı Madde Oranı	Min. 38%
Viskozite	Max 150 cP (25°C)
pH (%2 çözelti)	6,5 – 9

3.1.5. Su

Harç karışımlarının hazırlanmasında Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.6. Deniz suyu

Harç numunelerinin durabilitesinin değerlendirilmesinde bazı deneylerde Antalya deniz suyu kullanılmıştır. Antalya kıyılarında deniz suyu, tipik olarak yüksek tuzluluk değerine sahip olup, ortalama ‰39 civarındadır. Deniz suyu, çözünmüş oksijen, nitrat ve fosfat gibi besin tuzlarını içermektedir. Antalya kıyısı yüzey deniz suyunun tipik kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te sunulmuştur [102].

Çizelge 3.5. Antalya kıyısı yüzey deniz suyu kimyasal özellikleri

Özellik	Değer
Tuzluluk (‰)	39,1
pH	8,35
Çözünmüş Oksijen (µM)	216
NO_3^- (µM)	0,45
PO_4^{3-} (µM)	0,05

3.2. Metot

Manisa (Gördes) ilçesinden temin edilen klinoptilolit türü zeolit, maksimum 1200°C sıcaklık kapasitesine ve 20°C/dakika ısıtma hızına sahip bir kül fırınında 600°C, 700°C ve 800°C sıcaklıklarında 1 saat süreyle kalsinasyona tabi tutulmuştur. Bu fırına ait görüntü Şekil 3.6'da sunulmuştur. Kalsinasyon öncesinde zeolit numuneleri seramik kaplara yerleştirilmiş, işlem sonunda ise fırından çıkarılarak hızlı bir soğuma süreci sağlamak amacıyla geniş metal tepsilere yayılmıştır. Harç örneklerinde, doğal ve kalsine edilmiş mikronize zeolit ile çimento ikamesi sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Kül fırını

Harç karışımlarında bağlayıcı/agrega oranı 1/3 ve s/ç oranı 0.50 olarak sabit tutulmuştur. Doğal ve kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlarda işlenebilirlik azalmaktadır. İşlenebilirliğin sabit kalmasını sağlamak için karışımlara süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Çalışmada oluşturulan 17 farklı karışım grubuna ait oranlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Harç karışım oranları

Seri	CEM I (g)	Zeolit (g)	Kalsine Zeolit (g)			Kum (g)	S/B	Su (g)	SA (g)
			600°C	700°C	800°C				
Z0	450	0	0	0	0	1350	0,5	225	0
Z5	427,5	22,5	0	0	0	1350	0,5	225	3,6
Z10	405	45	0	0	0	1350	0,5	225	4,65
Z15	382,5	67,5	0	0	0	1350	0,5	225	5,7
Z20	360	90	0	0	0	1350	0,5	225	6,75
K6Z5	427,5	0	22,5	0	0	1350	0,5	225	3,6
K7Z5	427,5	0	0	22,5	0	1350	0,5	225	3,6
K8Z5	427,5	0	0	0	22,5	1350	0,5	225	3,6
K6Z10	405	0	45	0	0	1350	0,5	225	4,65
K7Z10	405	0	0	45	0	1350	0,5	225	4,65
K8Z10	405	0	0	0	45	1350	0,5	225	4,65
K6Z15	382,5	0	67,5	0	0	1350	0,5	225	5,7
K7Z15	382,5	0	0	67,5	0	1350	0,5	225	5,7
K8Z15	382,5	0	0	0	67,5	1350	0,5	225	5,7
K6Z20	360	0	90	0	0	1350	0,5	225	6,75
K7Z20	360	0	0	90	0	1350	0,5	225	6,75
K8Z20	360	0	0	0	90	1350	0,5	225	6,75

Taze harç numunelerin yayılma çapı ve birim ağırlık değerleri incelenmiştir. Sertleşmiş harç numuneleri için ise birim ağırlık, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, kapiler su emme, klor iyon geçirimliliği, serbest ve kısıtlanmış rötre ile ıslanma-kuruma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numune boyutları, ilgili standartlar, her karışım için kullanılan örnek sayısı ve toplam örnek sayısı Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Deneylerde kullanılan numunelerin boyutları, ilgili standartlar ve örnek sayıları

Deney	Boyutlar (mm)	Standart	Her karışım için kullanılan numune sayısı (adet)	Toplam numune sayısı (adet)
Yayılma tablası	-	TS EN 1015-3	3	51
Basınç dayanımı	50x50x50	TS EN 196-1	5	85
Ultrases geçiş hızı	50x50x50	ASTM C597-02	5	15
Kılcallık	50x50x50	TS EN 1015-18	5	15
Klor iyon geçirgenliği	100x50	ASTM C1202	3	9
Boy Değişimi	25x25x285	ASTM C157/C157M	5	15
Islanma-kuruma	50x50x50 25x25x285	-	5	30
Kısıtlanmış Rötre	dış çap:320 iç çap:200 yükseklik:140	ASTM C1581/C1581M	3	9

3.2.1. Harç deneyleri

TS EN 196-1 standardına uygun olarak, kütlece 1 birim çimento, 3 birim standart CEN kumu ve 0,50 s/ç oranı kullanılarak harç numuneleri hazırlanmıştır [103]. Hazırlanan karışımlardan 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Otomatik harç mikseri yardımıyla, karıştırıcı başlangıçta su ve çimentoyu düşük hızda 30 saniye boyunca karıştırmaya başlamış olup, ardından 30 saniye içinde karışıma kum eklenmiştir. Sonrasında, karıştırıcı yüksek hızda karıştırma işlemine 30 saniye daha devam etmiştir. Toplamda 1 dakika 30 saniye sonunda karıştırıcı otomatik olarak durmuştur. Bu aşamadan sonra, lastik sıyırıcı yardımıyla kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç manuel olarak sıyrılarak karışımın ortasına toplanmıştır. Son olarak, karıştırıcı yeniden yüksek hızda çalışarak 60 saniye daha karıştırma işlemine devam edilmiş ve homojen bir harç elde edilmiştir. TS EN 196-1 standardında belirtilen dönme hızları Çizelge 3.8'de verilmiştir [103].

Çizelge 3.8. TS EN 196-1 standardında belirtilen dönme hızları

	Kendi ekseni etrafında dönme hızı dakika $^{-1}$	Yörüngesel dönme hızı dakika $^{-1}$
Düşük hız	140 + 5	62 + 5
Yüksek hız	285+10	125+10

Harç numuneleri, Şekil 3.7'de gösterilen otomatik harç mikseri yardımıyla hazırlanmıştır. Şekil 3.8'de yer alan uygulamaya göre, hazırlanan numuneler kalıplara yerleştirilmiş ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak (20±2) °C sıcaklıkta kür havuzuna alınmıştır. Kür havuzundan çıkarılan sertleşmiş harç numuneleri ise Şekil 3.9'te verilmiştir.



Şekil 3.7. Harç numunelerinin hazırlanması kullanılan otomatik harç mikseri





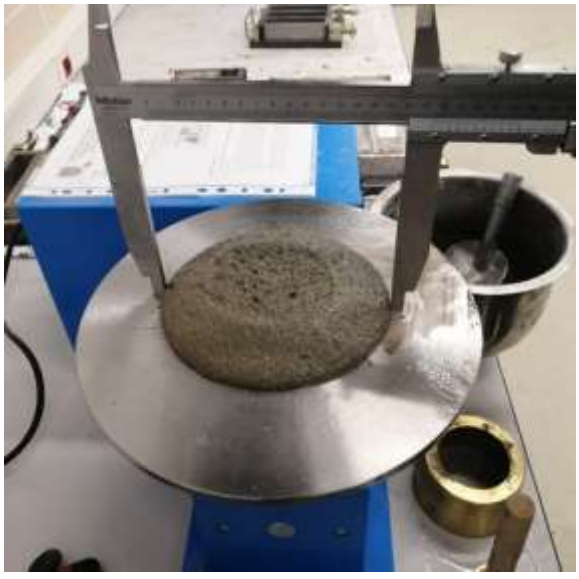
Şekil 3.8. Harç numunelerinin kalıplara yerleştirilmesi ve kürlenmesi



Şekil 3.9. Sertleşmiş harç numuneleri

Yayılma deneyi

TS EN 196-1 [103] standardına uygun olarak hazırlanan harç numuneleri, TS EN 1015-3 [104] standardına uygun şekilde, yayılma tablasında kesik konik kalıp kullanılarak, çelik bir kaba iki kat halinde yerleştirilmiş ve her bir kat 25 kez sıkıştırılmıştır. Ardından, kesik konik kalıp yavaşça yukarı kaldırılarak çıkarılmıştır. Son olarak, yayılma tablası 15 saniye boyunca 25 kez düşürülerek sarsılmıştır. Sarsma işlemi sonrasında, harcın taze haldeki kıvamını belirlemek amacıyla yayılma çapı her iki dikey yönde ölçülüp, elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Harç numunelerinin yayılma tablası deneyi Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Harç numunelerinin yayılma tablası deneyi

Harç basınç dayanımı deneyi

Çimento yerine doğal ve kalsine zeolit kullanılarak hazırlanan 50×50×50 mm boyutlarındaki harç numuneleri, TS EN 196-1 standardına göre basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Her deney serisinde 5 adet numune değerlendirilmiştir. TS EN 196-1 standardına göre, harçların basınç dayanımı testinde yükleme hızı 2400 N/sn olarak deney numunelerinde sabit tutulmuştur. Harçların basınç dayanımı ölçümleri, Şekil 3.11'de görülen test cihazı kullanılarak uygulanmıştır.



Şekil 3.11. Harç numunelerine yapılan basınç deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyi

Ultrases geçiş hızları, 28 günlük harç numuneleri üzerinde ASTM C597-02 [105] standardına uygun olarak ölçülmüş ve hesaplamalar "Eş. 3.1" ile yapılmıştır. Her bir seri için 5 numune test edilmiştir. Ultrases geçiş hızını belirlemek için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.12'de sunulmaktadır.

$$V = \frac{S}{t} \times 10^3 \quad (3.1)$$

Formülde;

V= Ultrases geçiş hızı (km/sn),

S= Ses dalgaları arasındaki uzaklık (m),

t= Dalga iletim süresi (µs).



Şekil 3.12. Ultrases geçiş hızı deney aleti

Kapiler su emme deneyi

Kapiler su emme deneyinde, numunelerin kılcallık katsayısı TS EN 1015-18 [106] standardına uygun olarak belirlenmiştir. İlk olarak, numuneler 105°C'de etüvde, ağırlıkları sabitlenene kadar kurutulmuştur. Numunelerin yalnızca alt yüzeylerinin su emmesini sağlamak amacıyla yan yüzeyleri 10 mm'lik parafinle kaplanmıştır. Kapiler su emme deney düzeneği Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Deney boyunca, harç numunelerinin alt yüzeyindeki su seviyesi 3±1 mm olarak sabit tutulmuştur. Numuneler, belirli zaman aralıklarında (1, 4,

9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 225, 256, 289, 324, 354, 1440 dakika) tartılarak, kılcallık katsayıları "Eş. 3.2" kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \tag{3.2}$$

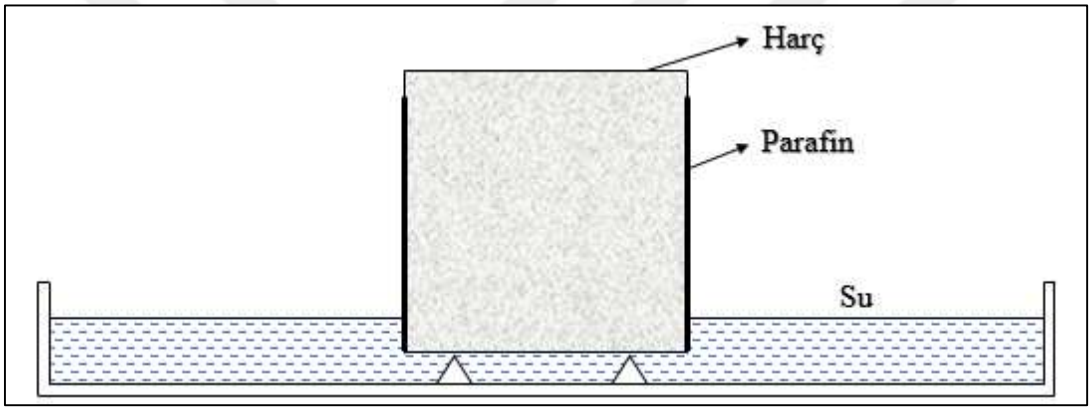
Formülde;

Q= Numune tarafından emilen su hacmi (cm^3),

A= Numunenin su ile temas eden yüzey alanı (cm^2),

k= Kılcallık katsayısı ($cm/s^{1/2}$),

t= Süre (sn)



Şekil 3.13. Kapiler(kılcallık) su emme deney düzeneği

Klor iyon geçirgenliği deneyi

Klor iyonu geçirgenlik deneyleri, ASTM C1202 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [107]. Deneyler, Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında yapılmış olup, 28 günlük kür süresini tamamlayan 10x20 cm boyutlarındaki silindir harç numunelerinden 5 cm yüksekliğinde kesitler alınarak hazırlanmıştır. Çalışmaya ilişkin görseller Şekil 3.14'de sunulmaktadır.



Şekil 3.14. Numunelerin kesilmesi

ASTM C1202 standardında belirtilen hızlı klor iyon geçirgenliği (RCPT) testi, harcın klor iyonlarına karşı geçirgenlik direncini ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu testte, numuneler, Şekil 3.15'de gösterilen deney düzeneği gereği, iki ayrı hücre arasına yerleştirilmiştir. Hücrelerden biri, saf su ile hazırlanmış %3 NaCl çözeltisi, diğeri ise saf su ile hazırlanmış 0,3 N NaOH çözeltisi içermektedir. Bu çözeltiler, numune üzerinden iyonların hareketini sağlamak üzere elektrotlara bağlanmıştır. Her bir numuneye, 6 saat boyunca 60 V sabit bir elektrik potansiyeli uygulanmıştır. Bu süre boyunca geçen elektrik yükü (Coulomb olarak) ölçülerek harcın klor iyonlarına karşı geçirgenlik performansı değerlendirilmiştir. Hazırlanan numuneler için yapılan klor iyon geçirgenliği deney düzeneği Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Klor iyon geçirgenliği deneyi düzeneği

Harç boy değişimi

Harç boy değişimi deneyi, ASTM C157/C157M standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [108]. Bu kapsamda, 25×25×285 mm boyutlarındaki prizma numuneler hazırlanmış ve deney için Şekil 3.16'da gösterilen kür ortamlarına yerleştirilmiştir. Numunelerin boy değişimleri, normal kür koşullarında, %15 Na_2SO_4 çözeltisi içerisinde [109] ve Antalya deniz suyu ortamında bekletilerek 7, 28, 56 ve 90 günlük sürelerde ölçülmüştür.



Şekil 3.16. Hazırlanan numunelerin kür ortamı

Kür ortamında bekletilen numunelerin boy değişimi ölçümleri Şekil 3.17'de verilen boy değişimi deney düzeneği yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 3.17. Ölçüm yapılan harç boy değişimi deney düzeneği

Islanma-kuruma deneyi

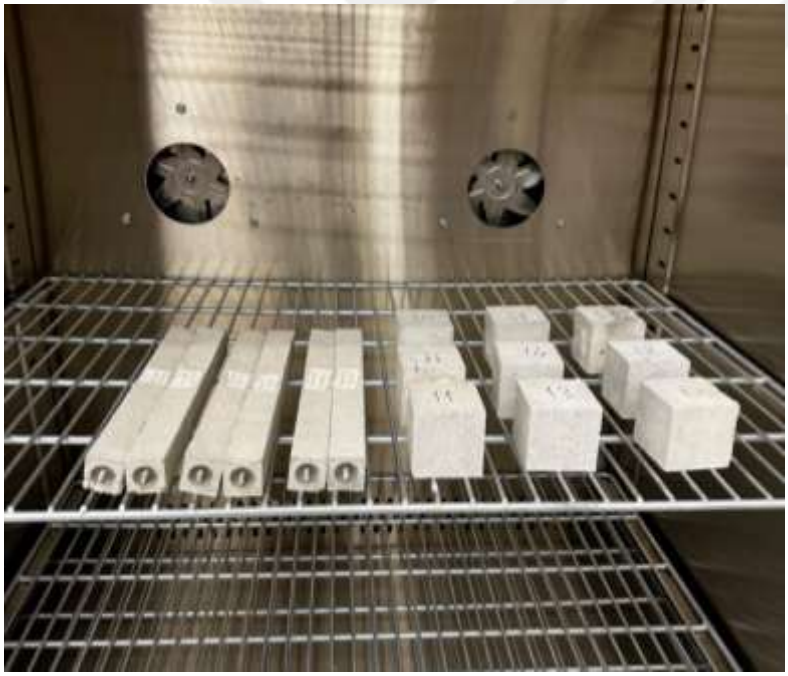
Durabilite, betonun çevresel faktörlere karşı direncini ifade eder ve betonun hava koşulları, kimyasal saldırılar, aşınma veya diğer bozulma süreçlerine karşı dayanıklılığını tanımlar. Dayanıklı bir beton, çevresel etkilere maruz kaldığında özgün formunu, kalitesini ve hizmet verebilirliğini koruyabilmelidir [110]. Günümüzde köprü, yol, tünel ve sulama yapıları gibi açık kullanım alanlarındaki yapıların beklenen hizmet ömrünün 75-100 yıl gibi uzun süreler olması, durabiliteyi betondan beklenen en kritik özelliklerden biri haline getirmiştir [111].

Betonların genellikle geçirgen bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum, suda çözünebilen kimyasalların beton içine nüfuz ederek fiziksel ve kimyasal etkilerle betonun özelliklerini olumsuz yönde etkilemesine yol açmaktadır. Islanma-kuruma çevrimleri, beton üzerinde hem fiziksel hem de kimyasal bozulmalara neden olan önemli bir mekanizmadır. Bu süreçlerin yol açtığı hasarlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşme ve bunun sonucunda meydana gelen rötre çatlakları.
2. Eriyen tuzların, beton boşluklarında kristalleşerek genişlemesi ve yapıyı mekanik olarak zorlayıp çatlamalara neden olması.
3. Düşük karbonat içeren suların, beton bileşenlerini çözerek yıkaması ve bu bileşenleri beton kütlesinden uzaklaştırması.
4. Islanma sırasında ani sıcaklık değişimlerinin, betonda termal gerilmeler yaratarak deformasyona yol açması.
5. Agresif sıvıların, hidrate çimento bileşenleriyle reaksiyona girerek yeni bileşikler oluşturması veya reaksiyon ürünlerinin yıkanarak uzaklaştırılması. Özellikle asitler ve magnezyum iyonu (Mg^{+2}) içeren sular, bu tür reaksiyonlara örnek teşkil eder.

Sıcak ve kurak iklim bölgelerinde, sulama kanalları, deniz dalgalarına maruz kalan kıyı yapıları ve geçirgen özellikteki açık spor tesisleri gibi yapıların, ıslanma-kuruma çevrimlerinden kaynaklanan etkilerle karşılaşma olasılığı oldukça yüksektir. Bu çevrimlerin, beton yüzeyinde tekrarlanan ıslanma ve kuruma süreçleri sonucunda aşınmalara yol açtığı bilinmektedir. Bu bağlamda, betonun geçirimsizlik özelliği, bu tür olumsuz etkilerin en aza indirgenmesinde kritik bir öneme sahiptir.

Islanma-kuruma deneyiyle ilgili herhangi bir standart bulunmamakla birlikte, deney kapsamında 50×50×50 mm ve 25×25×285 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Öner ve diğerlerinin (2014) çalışmalarında önerdiği yöntem temel alınarak, ıslanma-kuruma çevrimleri gerçekleştirilmiştir [111]. Bu yöntem kapsamında, numuneler önce 24 saat boyunca 105°C'de etüvde kurutulmuş, ardından 48 saat süreyle normal su içinde tam doygun hale getirilmiştir. Belirtilen bu çevrimler, deney süresi boyunca tekrarlanmıştır. Çevrimler, birinci gün kuruma, ikinci ve üçüncü gün ise ıslanma süreçlerini içeren üç günlük bir döngü şeklinde uygulanmıştır. Ayrıca, 28 günlük numunelere, normal kür, %15 $NaSO_4$ çözeltisi ve Antalya deniz suyu kür ortamlarında 48 saat bekletilme ve ardından 24 saat 105°C'de etüvde kurutulma işlemleri uygulanarak toplamda 10 döngüyle, 30 günlük ıslanma-kuruma çevrimleri gerçekleştirilmiştir [111,112]. Hazırlanan numunelerin kuruma döngüsü Şekil 3.18'de gösterilen 105 °C'de etüvde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Hazırlanan numunelerin kuruma döngüsü

Kısıtlanmış rötre deneyi

Kısıtlanmış rötre deneyi, ASTM C1581/C1581M standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [113]. Deney seti, iki halkadan oluşmakta olup, harç priz aldıktan sonra dış kalıp (halka) çıkarılmaktadır. Harç numunesinin üst kısmı silikonlanarak buharlaşma engellenmiş ve iç kalıp deney süresince yerinde tutulmuştur. Bu yöntemle rötre yalnızca

numunenin dış yüzeyinde meydana gelmesi sağlanmış, bu da dış yüzeydeki çekme gerilmelerinin çatlak oluşumuna neden olmasına olanak tanımıştır. Deneyde, iç çapı 270 mm, dış çapı 300 mm, yüksekliği 120 mm ve et kalınlıkları 13 mm ile 16 mm arasında değişen çelik halka kalıp kullanılmıştır (Şekil 3.19). Harç, kalıbın yarısına kadar dökülüp şişlendikten sonra yerleştirilmiş, ardından kalıp tamamen harç ile doldurulmuş ve yüzey düzgünleştirilmiştir. 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkarılmış, üst yüzeyine silikon sürülerek çevresel kuruma sağlanmıştır. Çatlak gelişiminin izlenmesi amacıyla özel bir mikroskop kullanılmış ve ilk çatlağın oluştuğu gün kaydedilmiştir. Çatlak genişlikleri, her gün ölçülerek belirlenmiş ve genişlikler sabitlenene kadar ölçüm yapılmaya devam edilmiştir.

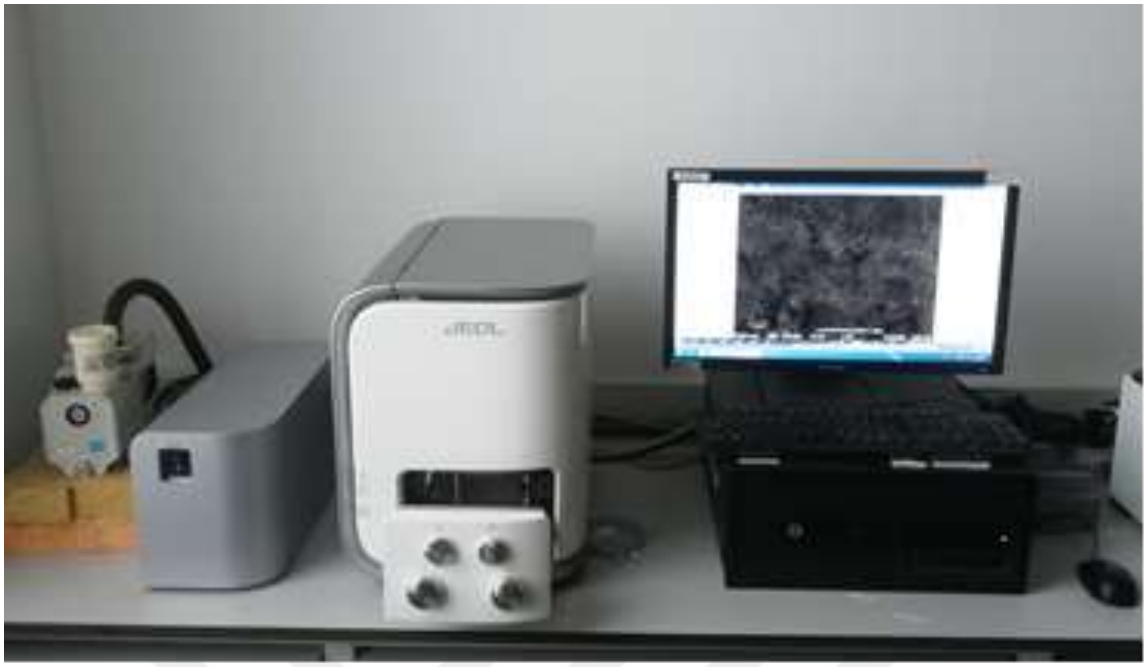


Şekil 3.19. Hazırlanan halka numuneler

3.2.2. Mikroyapı deneyleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntü elde etme, yüksek voltajla hızlandırılmış bir elektron ışınının örnek üzerine odaklanması ve ardından bu ışının örnek yüzeyi boyunca taranması işlemidir. Bu süreç sırasında, elektronlar ile örnek atomları arasındaki etkileşim sonucu oluşan etkiler, uygun dedektörler tarafından toplanır. Ardından, bu birikmiş bilgiler, sinyal yükselticilerinden geçtikten sonra bir katot ışın tüpü ekranına iletilir [114]. SEM analizleri, 28. günde kırılan harç numunelerinden alınan parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, Şekil 3.20'de gösterildiği üzere, JEOL (JCM-6000) marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.20. SEM cihazı

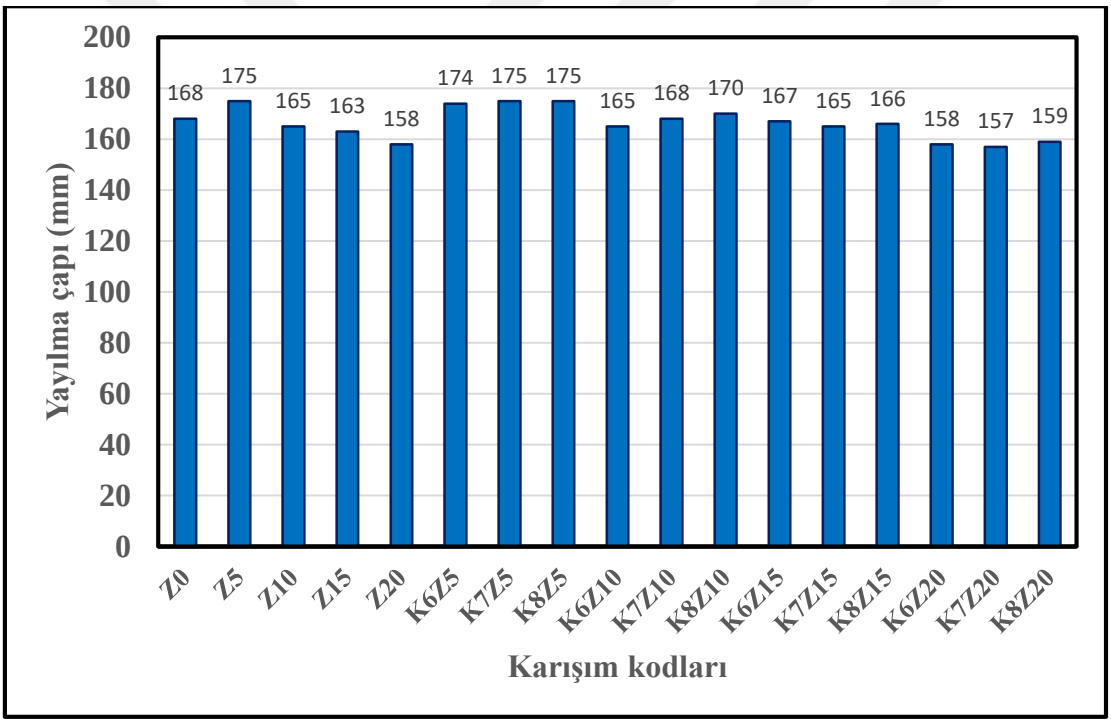
X-ışını kırınım (XRD) analizi

X-ışını kırınım analizi, örneğe X-ışınları ile ışınlama yapılarak, malzemedeki atomlar tarafından saçılan X-ışınlarının oluşturduğu kırınım desenlerinin analiz edilmesi prensibiyle çalışır. Bu kırınım X-ışınlarının açıları ve yoğunlukları, kristal kafesteki atomlar arası mesafeler ve örneğin elementsel bileşimi hakkında önemli bilgiler sunar. Bu nedenle, elde edilen veriler, kristalin fazlarının tanımlanması, kristal yapıların belirlenmesi ve örnekteki faz oranlarının nicel olarak hesaplanması için kullanılır. X-ışınlarının belirli açılarda kırınımı sağlanarak, saçılan ışınlar dedektörler aracılığıyla kaydedilir. Toz X-ışını kırınım tekniğiyle elde edilen analiz sonuçları, hazırlanan kataloglarla karşılaştırılarak spesifik minerallerin varlığı tespit edilir. Mikroskobik analizlere ek olarak, XRD analizi, farklı malzeme türlerinin mineralojik karakterizasyonu için uygun bir yöntem sunmaktadır [115].

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Harç Yayılma Deney Sonuçları

Bu çalışmada, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zeolit ve kalsine zeolit ikameli harçların işlenebilirliği, TS EN 1015-3 standardına uygun olarak, taze harçların yayılma değerleri ölçülerek yayılma testi ile değerlendirilmiştir. TS EN 1015-3 standardına göre, normal kıvamlı harçların yayılma çapı 165±10 mm olarak belirtilmiştir. Bu doğrultuda, hazırlanan tüm numunelerin yayılma değerleri 155 mm ile 175 mm arasında sabit tutulmuştur. Çalışmada elde edilen tüm yayılma testi sonuçları Şekil 4.1'de sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Hazırlanan taze harçların yayılma değerleri

Uzal (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmasında, farklı oranlarda doğal zeolit ikamesi ile hazırlanan harçlarda s/ç oranı sabit tutulmuş ve bu harçların yayılma değerlerinin kontrol harcıyla benzer olması için akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanmıştır [76].

4.2. Harç Birim Ağırlıkları

Farklı oranlarda doğal ve kalsine edilmiş zeolit ikame edilerek hazırlanan harç numuneleri

üzerinde gerçekleştirilen kuru ve doygun birim hacim ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

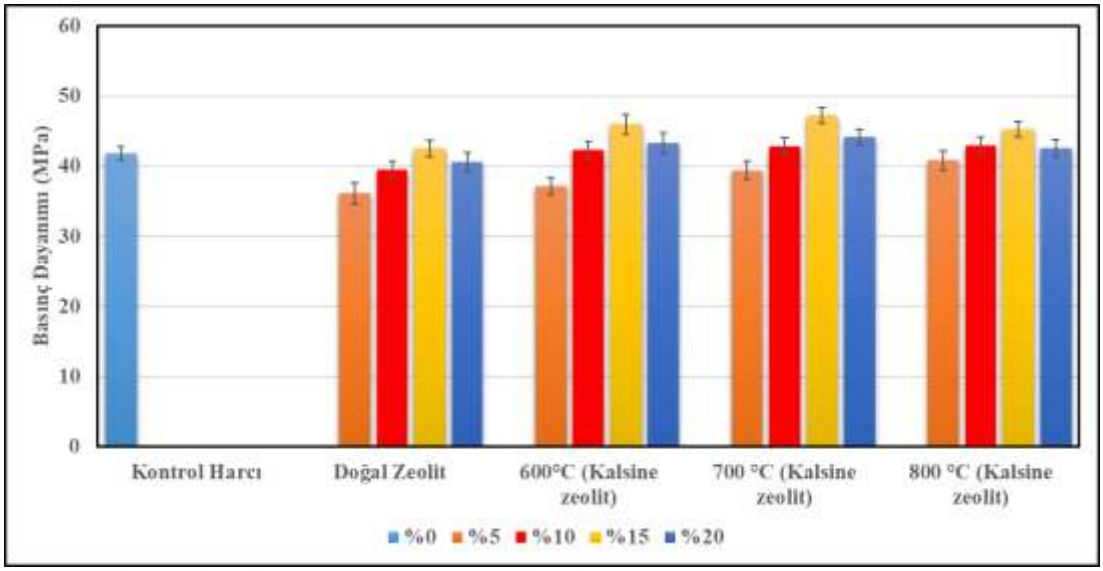
Çizelge 4.1. Harç numunelerinin 28 günlük birim ağırlıkları

Karışım Harcı	Kuru birim ağırlığı (g/cm^3)	Doygun birim ağırlığı (g/cm^3)
Kontrol Harcı	2,24	2,30
Z5	2,21	2,25
Z10	2,20	2,23
Z15	2,18	2,20
Z20	2,17	2,20
K7Z5	2,22	2,25
K7Z10	2,21	2,24
K7Z15	2,20	2,22
K7Z20	2,18	2,21

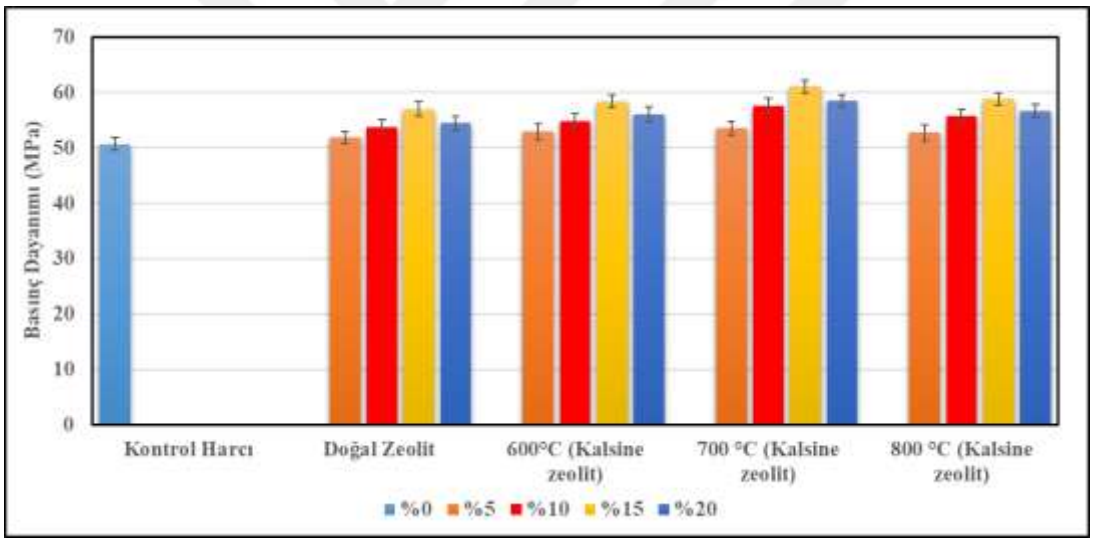
4.3. Harç Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Başlangıçta ön laboratuvar çalışmaları kapsamında, çimento yerine doğal ve kalsine zeolit ikamesi yapılan harç numunelerinin basınç dayanımı, 7 ve 28 günlük testlerle değerlendirilmiştir. Testler, 50x50x50 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve her seri beş numuneden oluşmuştur. Doğal zeolit ikamesi yapılan numuneler, erken yaşta (7 gün) kontrol numunesine kıyasla daha düşük dayanım göstermiş, ancak ilerleyen yaşlarda (28 gün) dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Özellikle, Z5, Z10 ve Z20 serisine ait doğal zeolit ikameli harçlar, 7 günlük testlerde kontrol numunesine göre daha düşük basınç dayanımı sergilerken, Z15 karışımı 42,52 MPa ile kontrol numunesine yakın bir dayanım değeri elde etmiştir. 28 günlük testlerde ise doğal zeolit ikamesi yapılan tüm karışımlar (Z5, Z10, Z15, Z20), kontrol numunesine göre daha yüksek dayanım göstermiş ve bu karışımlar arasında en yüksek dayanım 57,02 MPa ile Z15 karışımında kaydedilmiştir.

Kalsine zeolit ikamesi yapılan harçlarda, doğal zeolit ikamesi yapılan harçlara göre daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Özellikle, kalsine zeolit içeren harçlar arasında C7Z15 karışımı en iyi sonuçları vermiştir. Bu karışımın 7 günlük basınç dayanımı 47,26 MPa, 28 günlük basınç dayanımı ise 61,06 MPa olarak ölçülmüştür. Tüm numunelere ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



Şekil 4.2. 7 günlük basınç dayanımı



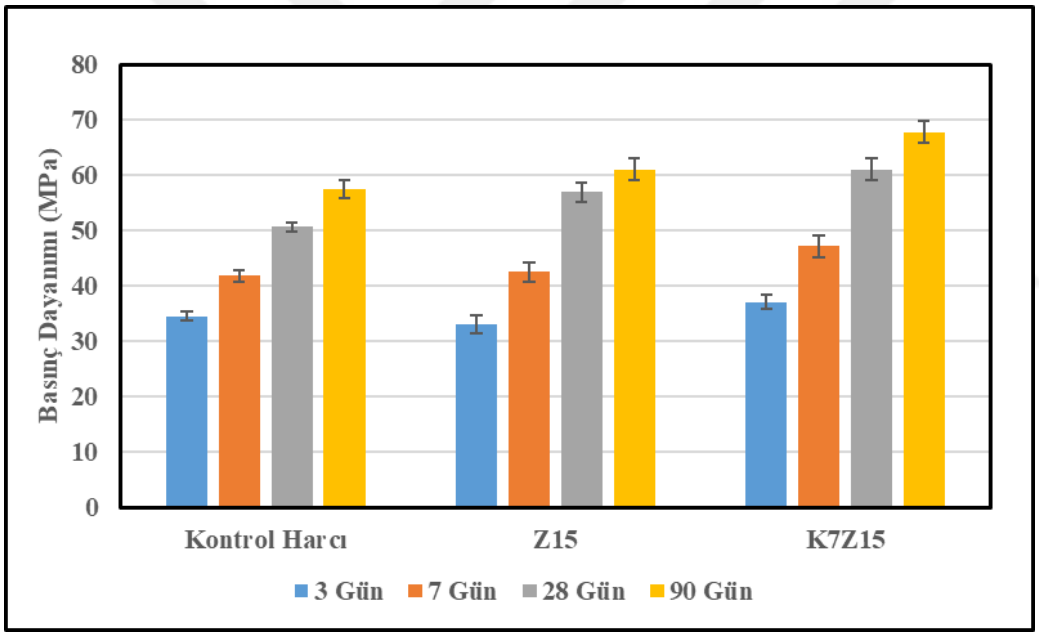
Şekil 4.3. 28 günlük basınç dayanımı

Florez ve arkadaşlarının çalışmasında (2021), öğütme inceliğinin basınç dayanımını artırdığı belirtmişlerdir [116]. Bu çalışmada doğal zeolit içeren harç karışımlarına ait 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarının, Ramezanianpour ve arkadaşları (2013) [117] ile Küçükyıldırım ve Uzal (2014) [71] tarafından rapor edilen bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan ön laboratuvar çalışmaları doğrultusunda, %15 oranında doğal ve kalsine zeolit ikamesinin en uygun sonuçları verdiği belirlenmiş ve bu oranla hazırlanan harç numuneleri 50x50x50 mm boyutlarında tekrar üretilerek 3 ve 90 günlük basınç dayanımları

değerlendirilmiştir. Z15 karışımı üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, kontrol numunesine kıyasla 3 günlük basınç dayanımı değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak, K7Z15 karışımının 3 günlük basınç dayanımı da kontrol numunesinden daha yüksek bulunmuştur. 90 günlük test sonuçları incelendiğinde, K7Z15 numunesi hem kontrol numunesinden hem de Z15 karışımından daha yüksek dayanım göstermiştir.

3 günlük basınç dayanımları sırasıyla kontrol numunesi 34,57 MPa, Z15 karışımı 33,08 MPa ve K7Z15 karışımı 37,14 MPa olarak ölçülmüştür. 90 günlük dayanımlarda ise kontrol numunesi 57,51 MPa, Z15 karışımı 61,13 MPa ve K7Z15 karışımı 67,88 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 4.4'te 3 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarına ait grafik verilmiştir.

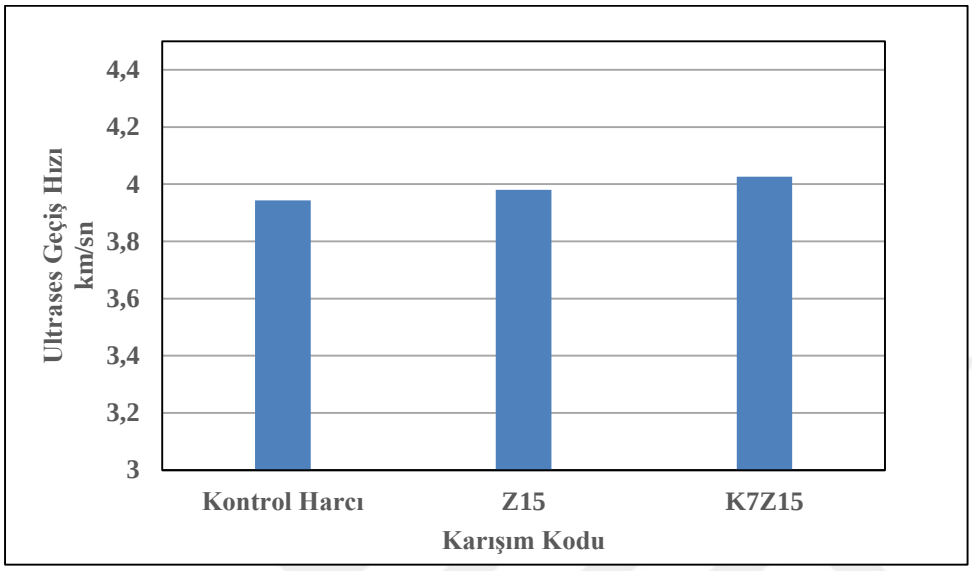


Şekil 4.4. Harçların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

4.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Basınç dayanımı için yapılan ön laboratuvar çalışmalarında en olumlu sonuçlar zeolit ikame oranı %15 ve kalsinasyon sıcaklığı 700 °C olarak belirlenmiş olup diğer laboratuvar deneyleri için Z15 ve K7Z15 karışım kodlu numuneler kullanılmıştır. Harç ve beton numunelerinde ölçülen ses dalgası hızları, numunelerin kompasitesi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ses dalgalarının geçiş hızı, numunelerdeki boşluk oranıyla ters orantılıdır; yüksek ses geçiş hızı, düşük boşluk oranını, düşük geçiş hızı ise artan boşluk

içeriğini ifade eder. Düşük boşluk içeriğine sahip numunelerde ses dalgaları daha hızlı ilerler, bu nedenle daha yüksek ses geçiş hızları elde edilir. Numunelere ait ultrases geçiş hızları Şekil 4.5'te sunulmaktadır.



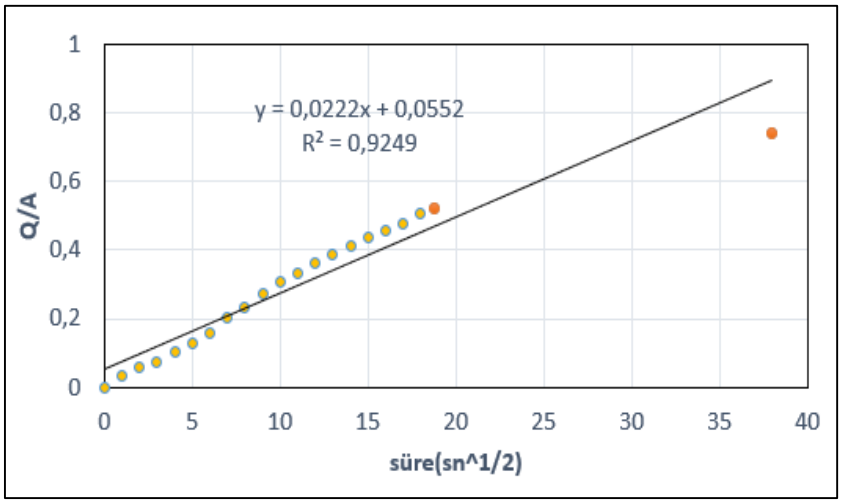
Şekil 4.5. Ultrases geçiş hızı sonuçları

Kontrol numunesinin ultrases geçiş hızı 3,94 km/sn olarak ölçülmüştür. %15 zeolit ikamesi yapılan numunenin ultrases geçiş hızı 3,98 km/sn, kalsine edilmiş zeolit içeren numunenin ise 4,03 km/sn olarak belirlenmiştir. Zeolitin amorf yapıya dönüşmesi ve ince öğütülmesi nedeniyle, kalsine zeolit ikameli harçlarda gözenek oranı azalır. Bu durum, kalsine zeolit ikameli numunelerin, kontrol numunesine ve doğal zeolit ikameli numunelere göre daha yüksek ultrases geçiş hızlarına sahip olmasına neden olmuştur.

Koçak ve Savaş (2019) yaptıkları çalışmada, 28 günlük numunelerde ağırlıkça %10 oranında zeolit ile ikame edilen betonların, referans numunelere kıyasla daha yüksek ultrases geçiş hızı değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu bulgu, mevcut çalışmada elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir[118].

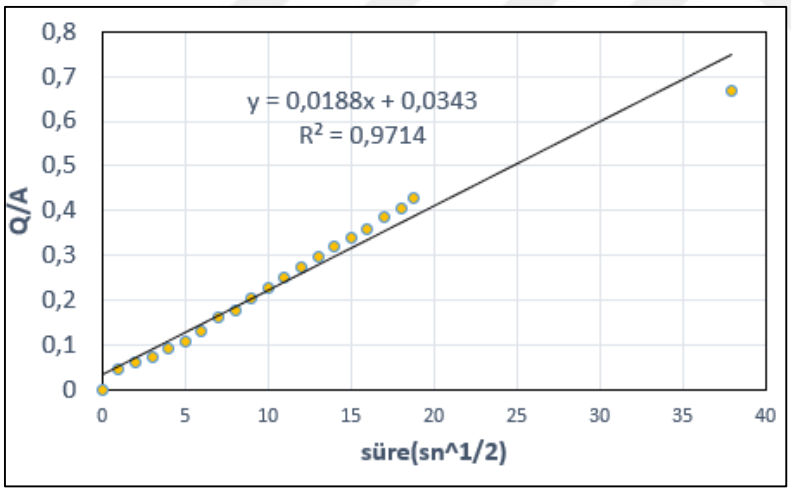
4.5. Kapiler Su Emme Deney Sonuçları

Her karışımdan 28 günlük 50x50x50 mm boyutlarındaki beş numune belirtilen zamanlarda tartılıp ortalaması alınarak kılcallık katsayıları hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına ait veriler ve grafikler Şekil 4.6-4.9'da sunulmaktadır.



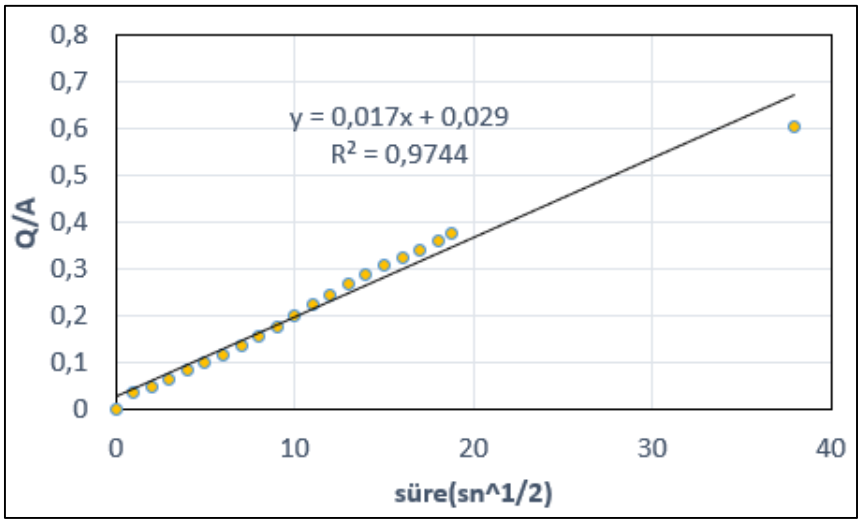
Şekil 4.6. Kontrol numunesi kapiler su emme deneyi

Kapiler su emme deneyi sonuçlarına göre, kontrol harcı diğer numunelere kıyasla daha fazla su absorpsiyonu göstermiştir. Deney kapsamında 24 saatin sonunda, kontrol harcına ait beş numunenin ortalama su emme miktarı 18,56 gram olarak ölçülmüştür.



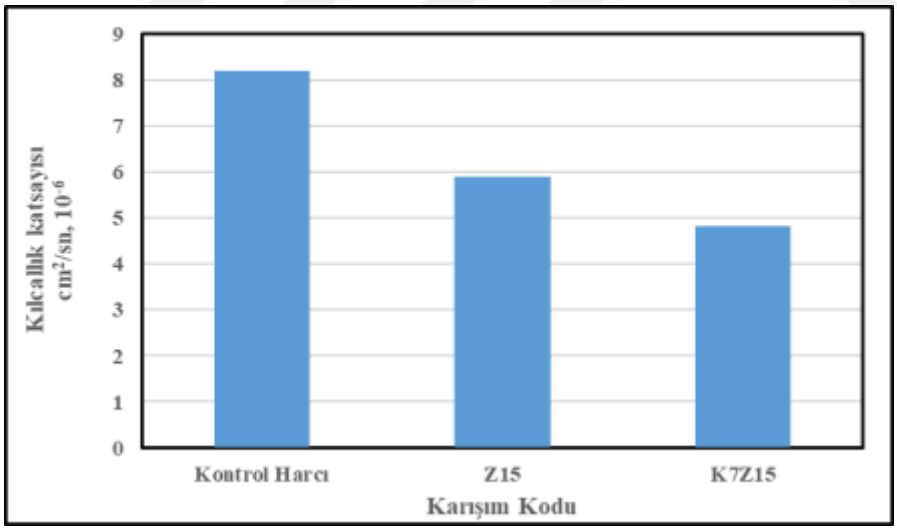
Şekil 4.7. Z15 karışımın kapiler su emme deneyi

Z15 karışımına ait numunelerde, 24 saat sonunda beş numunenin ortalama su emme miktarı 16,72 gram olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, Z15 karışımının kapiler su emme performansının kontrol harcına kıyasla daha yüksek geçirimsizlik sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.8. K7Z15 karışımın kapiler su emme deneyi

K7Z15 karışımına ait numunelerde, 24 saatlik kapiler su emme testi sonucunda, beş numunenin ortalama su emme miktarı 15,14 gram olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, K7Z15 karışımının kapiler su emme performansının hem kontrol harcı hem de Z15 karışımına kıyasla daha yüksek geçirimsizlik özelliği sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.9. Kılcallık katsayıları

Yapılan deney sonuçlarına göre, numunelerin kılcallık katsayıları belirlenmiş ve kontrol harcı için $8{,}21 \times 10^{-6}$ cm^2/sn, Z15 karışımı için $5{,}89 \times 10^{-6}$ cm^2/sn, K7Z15 karışımı için ise $4{,}82 \times 10^{-6}$ cm^2/sn olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, kontrol harcına kıyasla Z15 ve K7Z15 karışımlarında daha düşük kılcallık katsayıları elde edildiğini göstermektedir. Özellikle

K7Z15 karışımında ölçülen en düşük kılcallık katsayısı, bu karışımın daha az geçirgen bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, kalsine edilmiş zeolitin mikro yapıyı iyileştirme ve boşluk oranını azaltma etkisi ile ilişkilendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, literatürde zeolitin boşluk oranını azaltarak geçirgenlik performansını iyileştirdiğini ifade eden çalışmalarla da uyumludur.

Benzer şekilde, Ceylan vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, %15 mikronize zeolit ikameli betonlarda, hidratasyon ürünlerinin beton arayüzeyini ve boşlukları etkili bir şekilde doldurması sonucu kılcallık ve su emme değerlerinde daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir[119]. Ayrıca, Ahmadi ve çalışma arkadaşı Shekarchi (2010) tarafından yapılan başka bir çalışmada da %15 zeolit ikameli beton numunelerinin, kontrol numunesine kıyasla daha düşük su emme değerleri sergilediği bulunmuştur[120].

4.6. Klor-İyon Geçirgenliği Deney Sonuçları

Klor iyon geçirgenliği değerlendirmesi, ASTM C 1202 standardına göre yapılmış olup, bu standartta belirtilen geçirgenlik değerleri Çizelge 4.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. ASTM C 1202'ye göre klor iyon geçirgenliği değerlendirme tablosu

Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Her karışımdan 3 adet 28 günlük numune, klor iyon geçirgenliği deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen coulomb değerleri kaydedilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre, kontrol harcı orta seviyede geçirgenlik gösterirken, Z15 ve K7Z15 karışımları çok düşük geçirgenlik değerleri elde etmiştir. K7Z15 karışımı, hem kontrol harcı hem de Z15 karışımına kıyasla daha düşük coulomb değeri sergilemiştir. Bu durum, K7Z15 numunesinin daha düşük geçirgenlik değerine sahip olduğunu ve dayanıklılık açısından diğer karışımlara göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Klor iyon geçirgenliği deney sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

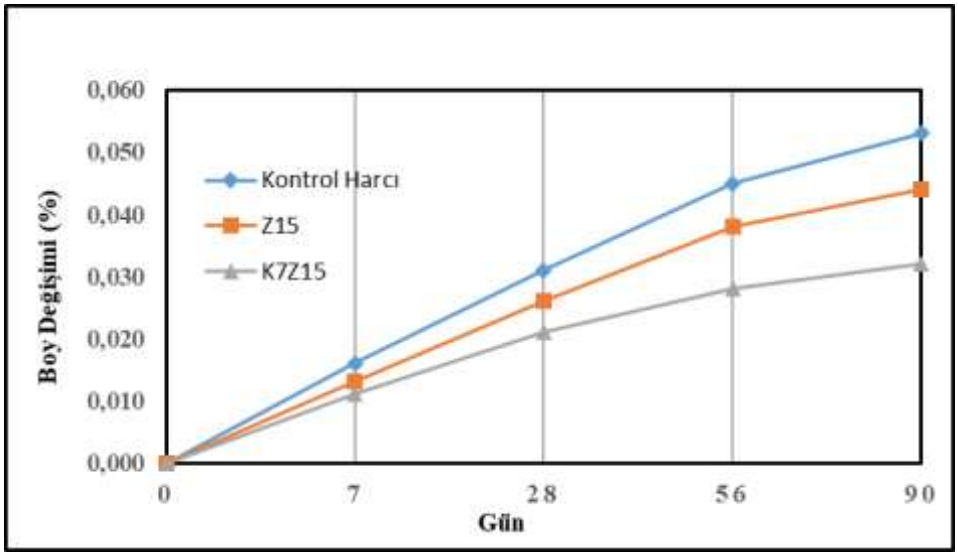
Çizelge 4.3. Klor iyon geçirgenliği deney sonuçları

Numune	Sonuç (Coulomb)
Kontrol Harcı	2959
Z15	739
K7Z15	600

Ramezanianpour vd. (2015), Ceylan vd. (2011) yapmış oldukları çalışmalarda da, %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numunelerin 28 gün sonunda kontrol numunelerine kıyasla belirgin şekilde düşük geçirimsizlik değerleri gösterdiği gözlemlenmiştir [121,119]. Uzal (2007) zeolit kullanımının, betonun klor iyon geçirgenliğini azalttığı ve böylece geçirimsiz beton elde edilmesinde avantajlar sağladığı tespit etmiştir [76]. Zeolitin geçirimsizlik üzerindeki etkisi, önceki literatür çalışmalarında olduğu gibi, bu tez çalışmasında da doğrulanmıştır.

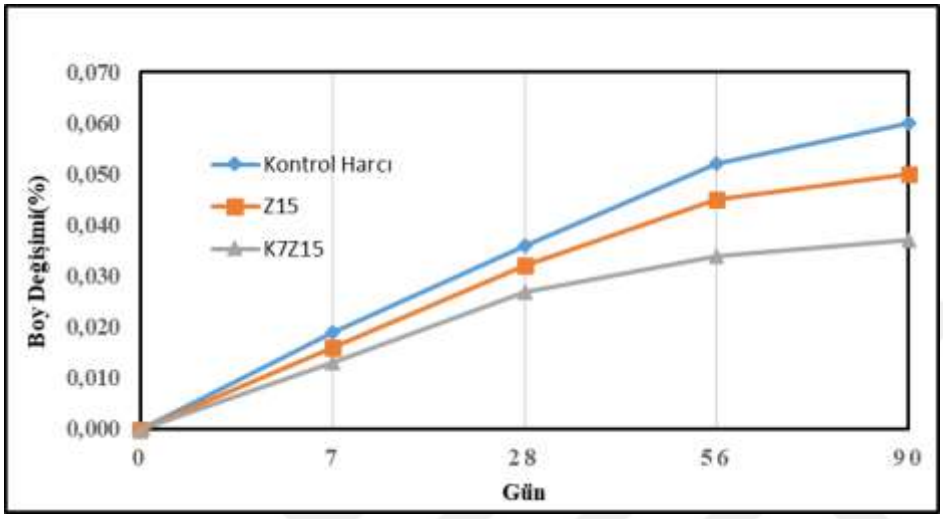
4.7. Harç Boy Değişimi Deney Sonuçları

ASTM C157/C157M standardına uygun olarak, her karışımdan 25×25×285 mm boyutlarında üçer adet numune kullanılarak, normal kür, %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ve Antalya deniz suyu küründe boy değişimleri ölçülmüş, ardından bu numunelerin ortalama boy değişimleri hesaplanmıştır. Karışımlara ait boy değişimi sonuçları Şekil 4.10-4.12'de sunulmaktadır.



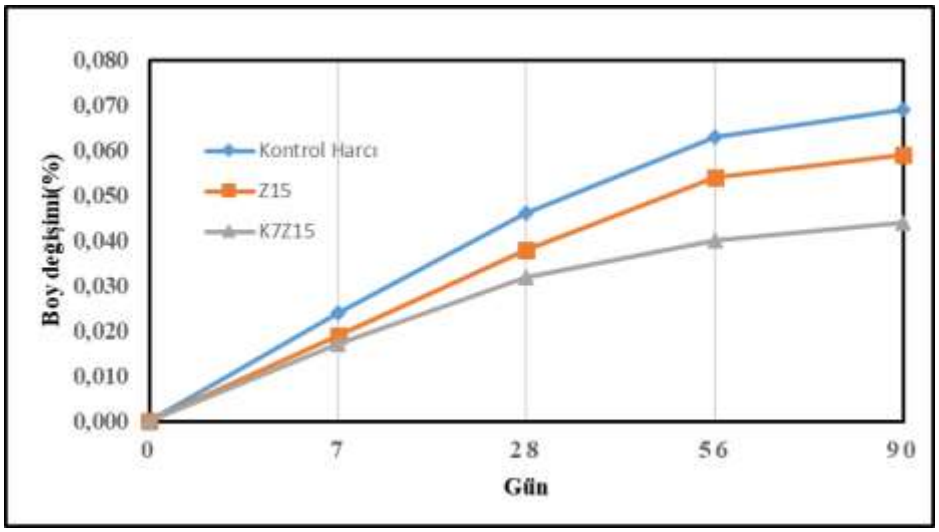
Şekil 4.10. Normal kür ortamında boy değişimi

Normal kür ortamında bekletilen numunelerin boy değişimi sonuçlarına göre, 7. günde her karışım benzer şekilde uzama göstermiştir. Ancak 90. günün sonunda, kontrol harcı %0,053 oranında, Z15 karışımı %0,044 oranında, K7Z15 karışımı ise %0,032 oranında uzama göstermiştir.



Şekil 4.11. Antalya deniz suyu kür ortamında boy değişimi

Antalya deniz suyu kür ortamında bekletilen numunelerin boy değişimi 90. günün sonunda, kontrol harcı %0,060 oranında, Z15 karışımı %0,050 oranında, K7Z15 karışımı ise %0,037 oranında uzama göstermiştir.



Şekil 4.12. %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında boy değişimi

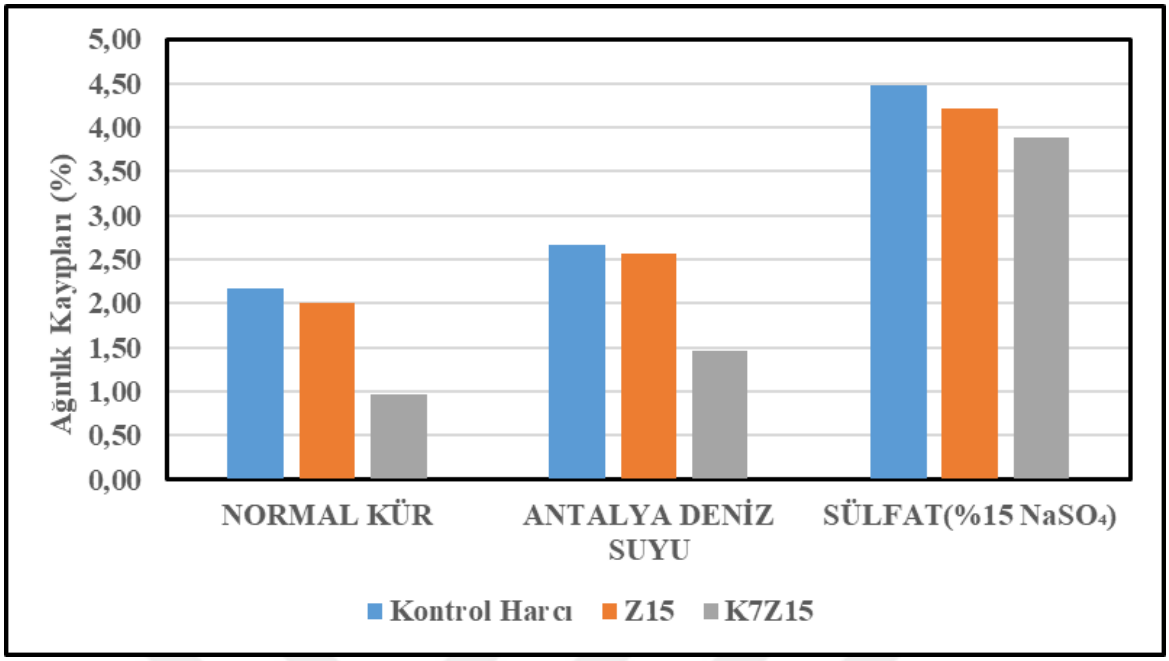
%15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında bekletilen numunelerin boy değişimi 90. günün sonunda, kontrol harcı %0,069 oranında, Z15 karışımı %0,059 oranında, K7Z15 karışımı ise %0,044 oranında uzama göstermiştir.

Normal kür ve agresif kür koşullarında gerçekleştirilen 7 günlük boy değişimi ölçümlerinde, tüm karışımlar birbirine benzer uzama davranışları sergilemiştir. Ancak, 90 günlük ölçümler sonucunda, en fazla boy değişiminin kontrol harcında gerçekleştiği tespit edilmiştir. En düşük boy değişimleri normal kür koşullarında gözlemlenirken, en yüksek boy değişimleri ise %15 $NaSO_4$ çözeltisi içeren kür ortamında meydana gelmiştir.

Ahmedi ve Shekarchi (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İran'ın Semnan bölgesine ait, d50 tane boyutu 16,84 µm olan doğal zeolitin çimento yerine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kullanılmasıyla elde edilen harç numuneleri incelenmiştir. Araştırmada, özellikle %10 ve %20 oranındaki zeolit ikamesiyle hazırlanan harçlarda, katkısız kontrol numunelerine kıyasla genleşme oranlarında kayda değer bir azalma meydana geldiği rapor edilmiştir [120]. Benzer şekilde, Ersoy ve çalışma arkadaşları (2024) yürüttüğü araştırmada da, %10 zeolit içeren harçların kontrol grubuna kıyasla daha düşük genleşme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Literatürde yapılan bu çalışmalar bu tez kapsamında benzer sonuçlar bulunmuştur[122]. Literatürde yer alan bu bulgular, bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla örtüşmekte olup, zeolit katkısının harçların boyutsal kararlılığı üzerinde olumlu etkiler yarattığını desteklemektedir.

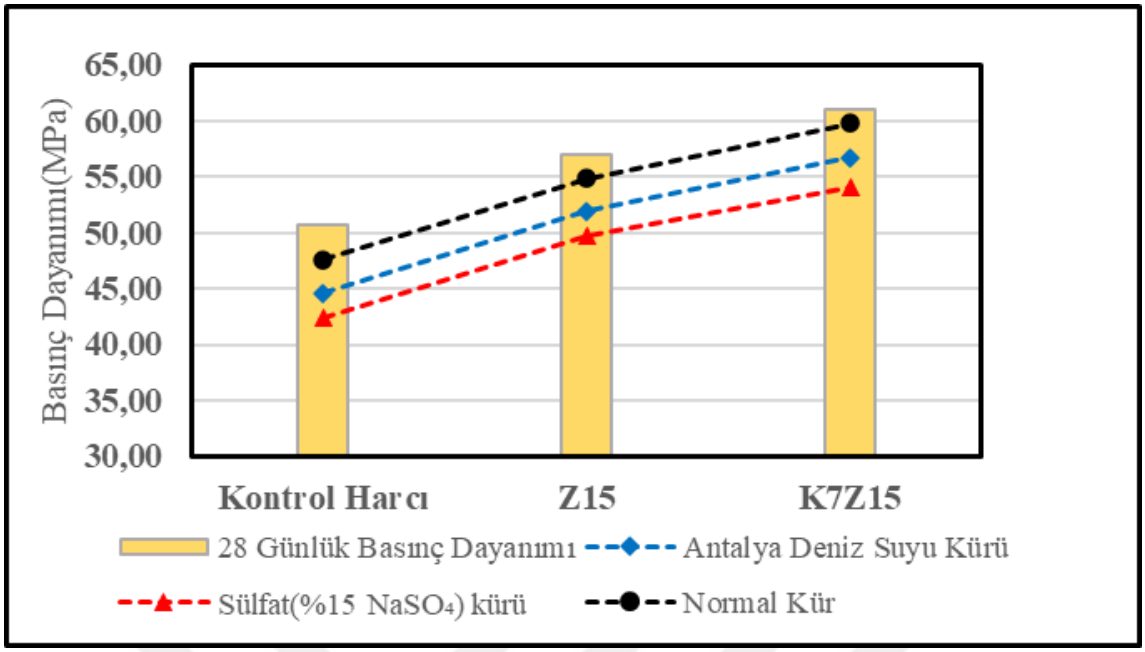
4.8. Islanma-kuruma Deney Sonuçları

28 günlük numuneler, ıslanma-kuruma döngülerine tabi tutulmuş ve bu işlemin ardından numunelerin ağırlıkları tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarına ilişkin veriler Şekil 4.13'te sunulmuştur. Ayrıca, 28 günlük numunelere uygulanan ıslanma-kuruma döngüsünün ardından basınç dayanımları test edilmiştir. Bu testlerden elde edilen sonuçlar, Şekil 4.14'te sunulmuştur.



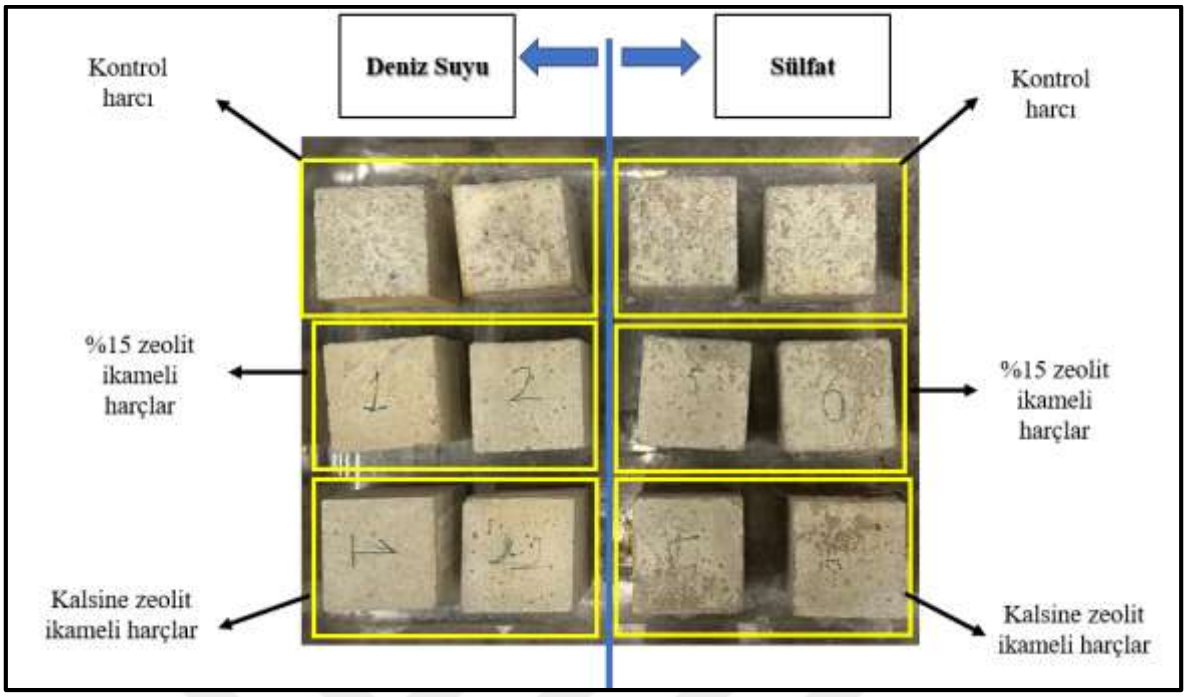
Şekil 4.13. Islanma-kuruma döngüsü sonrası ağırlık kayıpları

Islanma-kuruma döngüsü sonucunda farklı kür koşullarındaki ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Normal kür ortamında, kontrol harcı ağırlığının %2,17'sini, Z15 karışımı %2,01'ini, K7Z15 karışımı ise %0,96'sını kaybetmiştir. Antalya deniz suyu kür ortamında ise kontrol harcında %2,66, Z15 karışımında %2,57 ve K7Z15 karışımında %1,46 oranında ağırlık kaybı meydana gelmiştir. %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında ise kontrol harcı ağırlığının %4,47'sini, Z15 karışımı %4,21'ini ve K7Z15 karışımı %3,88'ini kaybetmiştir. Elde edilen bulgular, hem normal kür ortamında hem de agresif kür koşullarında en düşük ağırlık kaybının K7Z15 karışımlı numunelerde gerçekleştiğini göstermiştir. Bu durum, kalsinasyon işleminin harcın geçirimsizlik özelliği üzerinde olumlu bir etki yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.14. Islanma-kuruma döngüsü sonrası basınç dayanımları

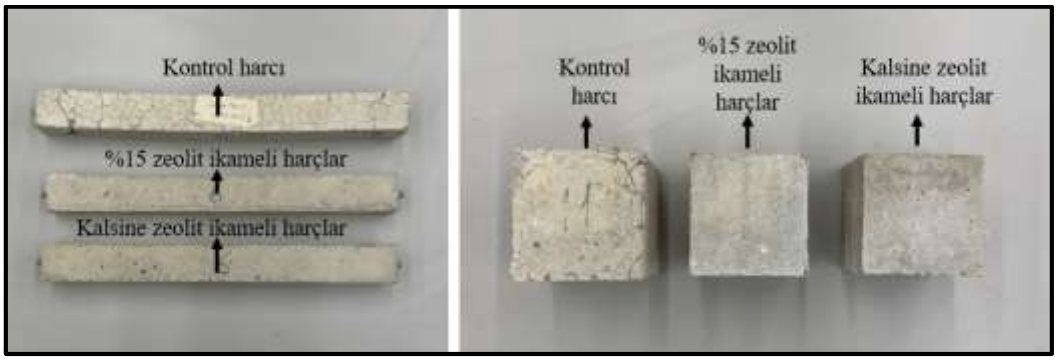
Islanma-kuruma döngüsü sonrasında farklı kür koşullarındaki basınç dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, normal kür ortamında kontrol harcı dayanımında %6,08'lik bir azalma gözlemlenirken, Z15 karışımında %3,86, K7Z15 karışımında ise %2,15'lik bir azalma meydana gelmiştir. Antalya deniz suyu kür ortamında kontrol harcı dayanımında %12,88'lik bir azalma, Z15 karışımında %9,28'lik bir azalma, K7Z15 karışımında ise %7,26'lık bir azalma tespit edilmiştir. %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında ise kontrol harcı dayanımında %18,67, Z15 karışımında %12,13 ve K7Z15 karışımında %10,60'lık bir azalma görülmüştür. Genel olarak, tüm kür ortamlarında en düşük azalma K7Z15 karışımına ait numunelerde gözlemlenmiş ve K7Z15, en iyi performansı sergileyen karışım olmuştur. Ayrıca ıslanma-kuruma döngüsü sonucundan numunelerin yüzeyinde oluşan deformasyon görüntüleri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Islanma-kuruma döngüsü sonrası numunelerin görüntüleri

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, kontrol harcı ile yapılan ıslanma-kuruma döngüsü deneylerinde, yüzeyde meydana gelen deformasyonlar, %15 zeolit ikameli harçlar ve 700 °C'de kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlara kıyasla daha belirgindir. Antalya deniz suyu kür koşullarında yapılan ıslanma-kuruma döngüsü deneylerinde ise Z15 ve K7Z15 karışımlarında gözle görülür bir deformasyon oluşmazken, kontrol harcında belirgin deformasyonlar meydana gelmiştir. %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında yapılan deneylerde, Z15 ve K7Z15 karışımlarındaki deformasyonlar, kontrol harcına göre daha az olmuştur. Ayrıca, K7Z15 karışımında oluşan deformasyon, Z15 karışımına göre daha düşük seviyede gözlemlenmiştir.

Farklı kür ortamlarının numuneler üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi amacıyla, numuneler 270 gün süreyle bu kür ortamlarında bekletilmiştir. Antalya deniz suyu ve normal kür ortamlarında bekletilen numunelerde belirgin deformasyonlar oluşmazken, %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında bekletilen numunelerde belirgin deformasyonlar gözlemlenmiştir. Oluşan deformasyonlar, Şekil 4.16'da sunulmaktadır.



Şekil 4.16. %15 Sodyum sülfat ($NaSO_4$) içeriğinde 270 gün bekletilen numuneler

Şekil 4.16'da görüldüğü üzere, %15 $NaSO_4$ çözeltili kür ortamında bekletilen kontrol harçlarında belirgin genleşmeler ve çatlaklar oluşmuş, ayrıca yüzeylerinde parçalanmalar gözlemlenmiştir. Buna karşılık, Z15 ve K7Z15 numunelerinde belirgin genleşmeler ve çatlaklar meydana gelmemiştir.

Canpolat ve Yılmaz (2002), yapmış oldukları çalışmada benzer olarak, %5 ve %10 oranlarında sodyum sülfat çözeltilerinde, %15 zeolit ve %5 uçucu kül içeren harç numunelerinin sülfata karşı dayanıklılığı artırdığını tespit etmiştir [91].

4.9. Kısıtlanmış Rötre Deney Sonuçları

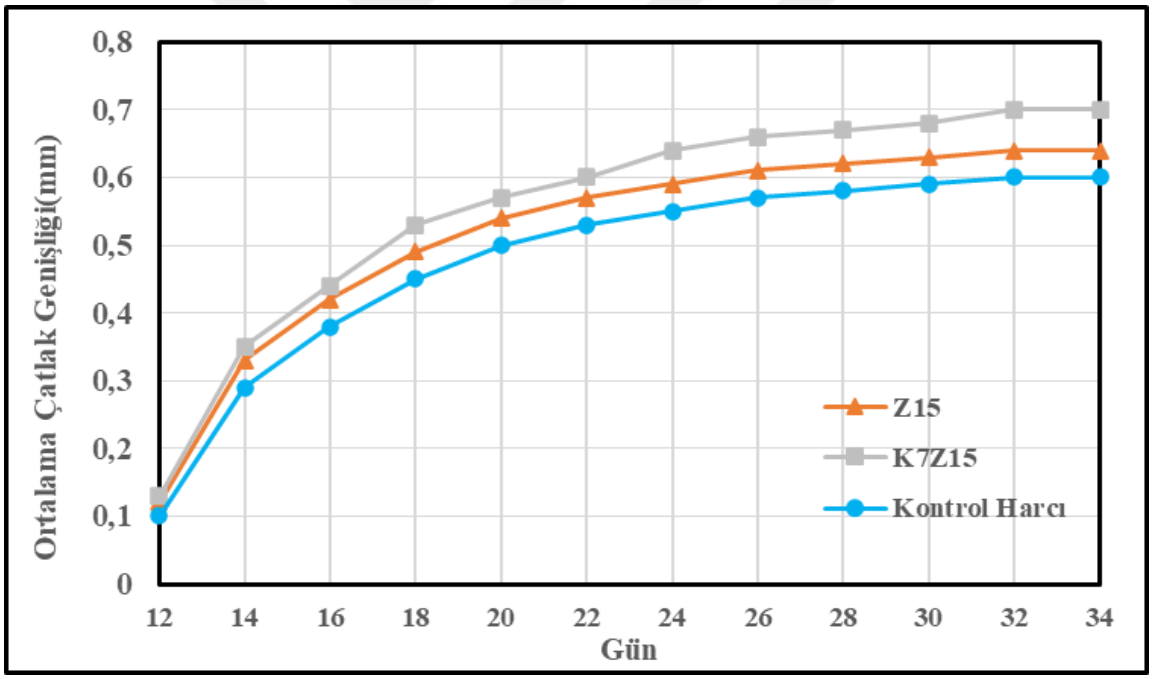
Kısıtlanmış rötre deneyi sonucunda numunelerin çatlak genişlikleri, özel bir mikroskop kullanılarak ölçülmüştür. Örnek bir ölçüm, Şekil 4.17'de gösterilmekte olup, tüm ölçüm sonuçları Çizelge 4.4 ve Şekil 4.18'de sunulmaktadır.



Şekil 4.17. Kısıtlanmış rötre örnek çatlak genişliği ölçümü

Çizelge 4.4. Kısıtlanmış rötre çatlak genişlikleri

Kısıtlanmış Rötre Ortalama Çatlak Genişliği (mm)			
Gün	Kontrol Harcı	Z15 Karışımı	K7Z15 Karışımı
12	0,10	0,12	0,13
14	0,29	0,33	0,35
16	0,38	0,42	0,44
18	0,45	0,49	0,53
20	0,5	0,54	0,57
22	0,53	0,57	0,6
24	0,55	0,59	0,64
26	0,57	0,61	0,66
28	0,58	0,62	0,67
30	0,59	0,63	0,68
32	0,60	0,64	0,7
34	0,60	0,64	0,7



Şekil 4.18. Karışımların kısıtlanmış rötre çatlak genişliklerinin grafik gösterimi

Kısıtlanmış rötre deneyi sonuçlarına göre, en büyük çatlak genişliği K7Z15 karışımında gözlemlenirken, en küçük çatlak genişliği kontrol harcında tespit edilmiştir. Zeolitin yüksek su emme kapasitesi, harç karışımında suyun hızlı bir şekilde emilmesine ve kuruma aşamasında hızla kaybolmasına yol açmaktadır. Kısıtlanmış rötre deneyinde kür uygulanmaması, suyun bu hızla kaybını destekleyen bir ortam oluşturmuş, bu durum ise iç gerilimlerin artmasına ve dolayısıyla çatlak oluşumunun kontrol harcına göre daha belirgin

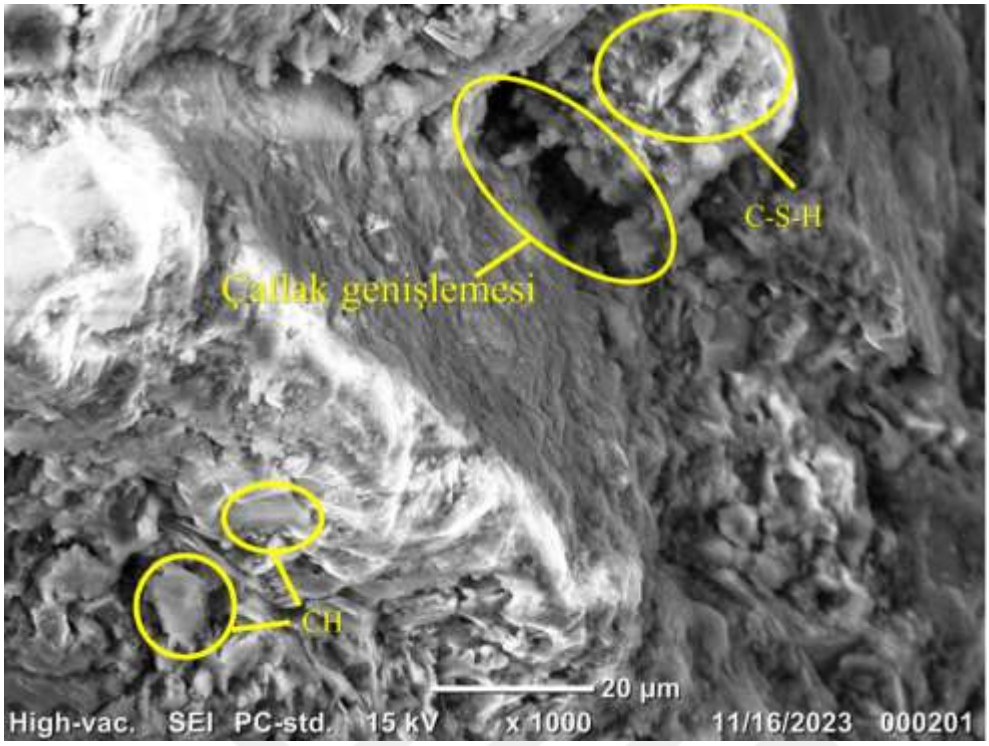
hale gelmesine sebep olmuştur. Zeolitin suyu hızla emme özelliği, özellikle kür uygulanmayan koşullarda, reaksiyonların devam edebilmesi için gereken suyun hızla kaybolmasına yol açmış, bu da çatlakların daha fazla genişlemesine neden olmuştur. Kontrol harcında ise katkı maddesi kullanılmayan yapısal özellikler sayesinde su kaybı daha dengeli bir şekilde gerçekleşmiş ve bu da daha az çatlak oluşumuna sebep olmuştur. Benzer şekilde, Snehal ve Das (2022), yapmış oldukları çalışmada nano-silika katkılı optimize edilmiş çimento harçlarında, su dengesi ve kür koşullarının yetersiz olduğu durumlarda kuruma kaynaklı rötre miktarının arttığı bildirilmiştir [123].

Hu et al. (2017) tarafından ASTM C1581'e göre gerçekleştirilen kısıtlanmış rötre deneylerinde, ince taneli bağlayıcı kullanımı çatlama davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Çalışmada cüruf içeren karışımların serbest rötre değerlerinin daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak çatlak oluşumunun daha erken gerçekleştiği bildirilmiştir. Araştırmacılar, cürufun yüksek kimyasal ve otogenik rötre üretmesi, daha düşük sünme kabiliyeti ve daha kırılgan matris oluşturması nedeniyle çatlama direncini düşürdüğünü ifade etmişlerdir[124].

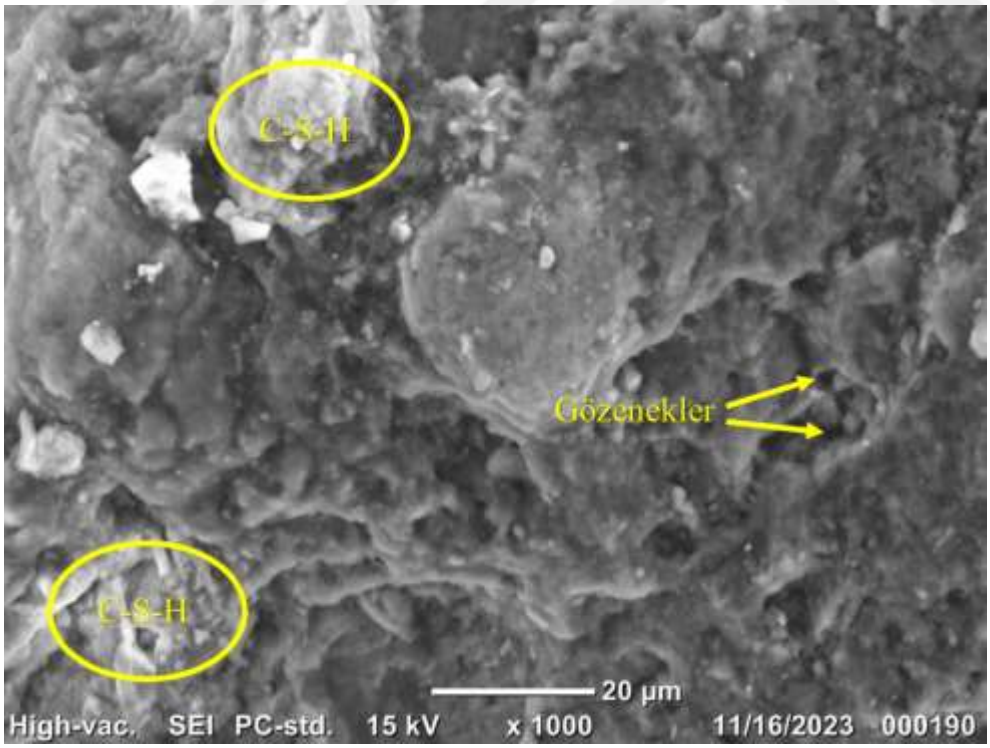
4.10. Mikroyapı Deney Sonuçları

4.10.1. SEM analizi

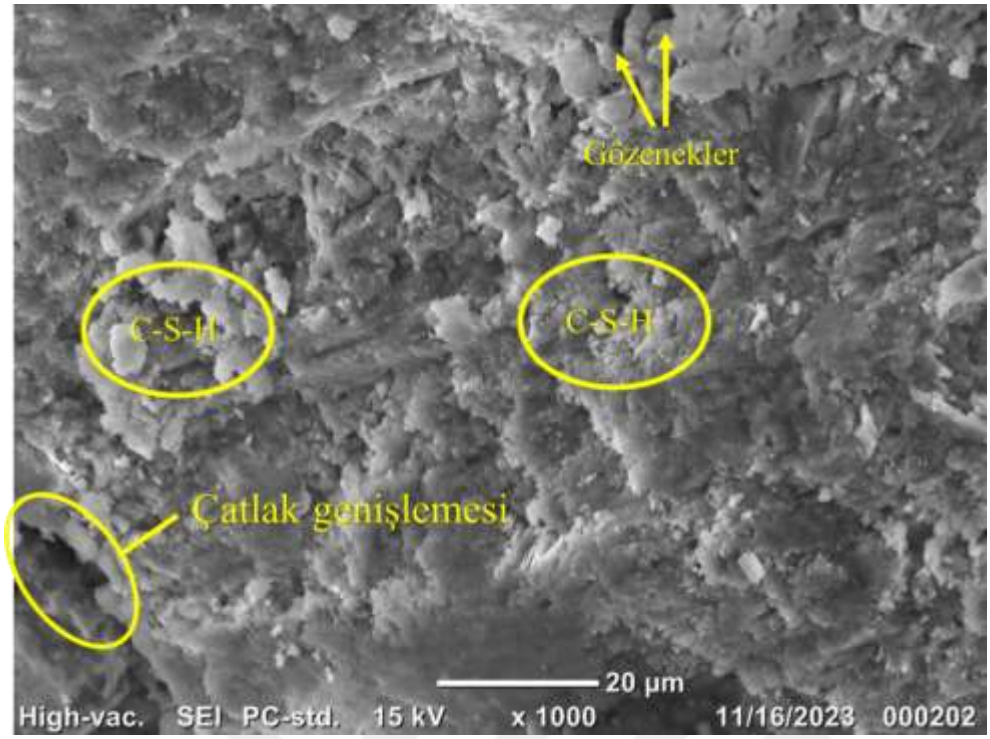
Doğal ve kalsine zeolitin %15 oranında ikamesine sahip numunelerle birlikte kontrol numunelerinin mikro yapısını incelemek amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19-4.23'de numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



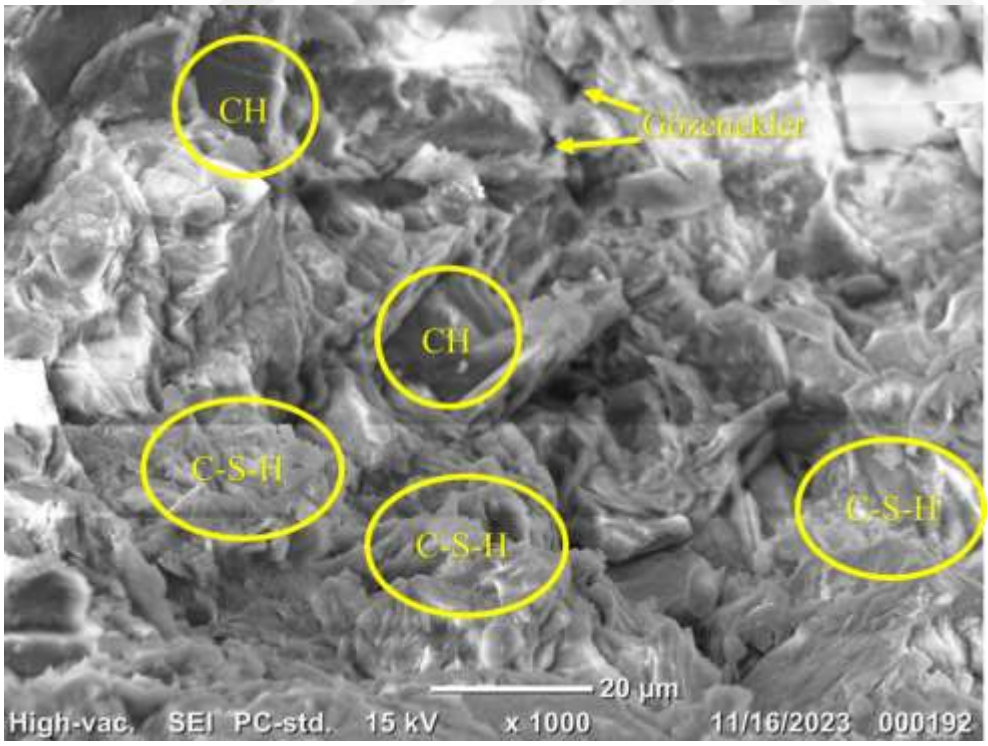
Şekil 4.19. Kontrol harcı SEM analizi



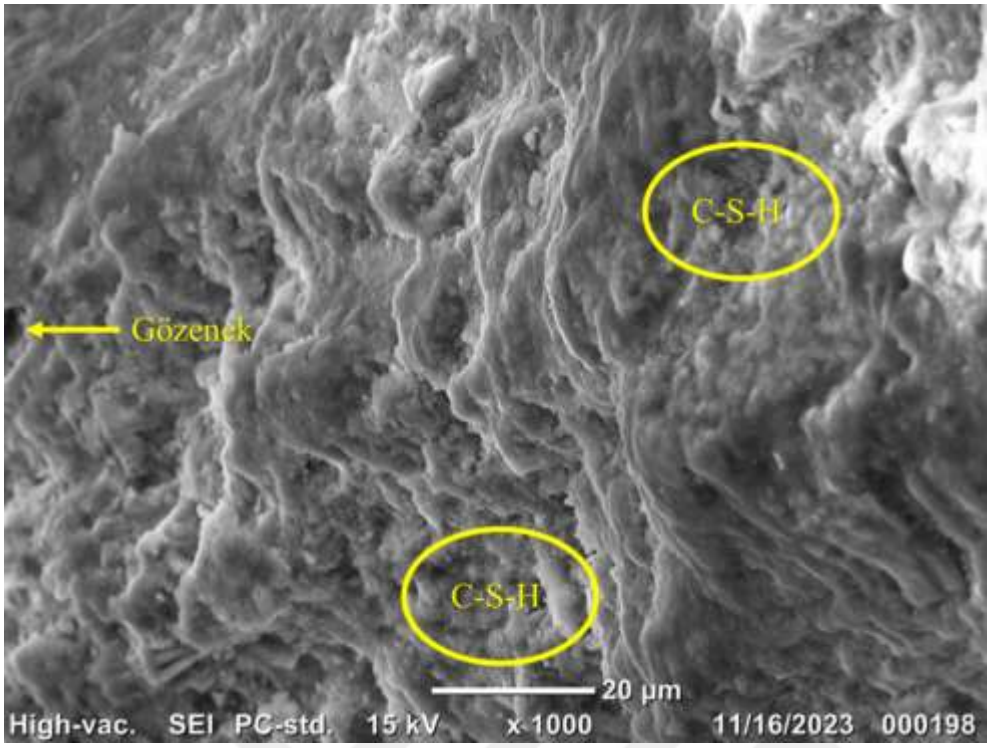
Şekil 4.20. Z15 karışımı SEM analizi



Şekil 4.21. K6Z15 karışımı SEM analizi



Şekil 4.22. K7Z15 karışımı SEM analizi



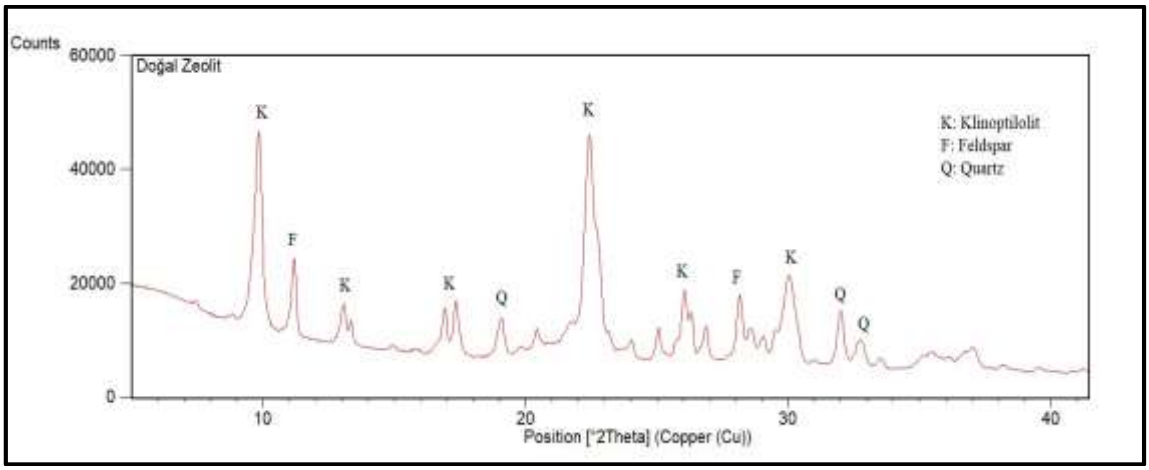
Şekil 4.23. K8Z15 karışımı SEM analizi

Şekil 4.19–4.23'te verilen SEM görüntülerine göre, numunelerde çimento hidratasyon ürünleri olan C-S-H ve kalsiyum hidroksit (portlandit) varlığını ortaya koymuştur. Özellikle, kontrol harçlarında daha fazla gözenek ve boşluk gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, kalsine zeolit ikamesi yapılan harçlarda C-S-H jellerinde belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu gözlemler, kalsine zeolit ikamesinin harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmiştir. Benzer şekilde, Li ve arkadaşları (2023) da zeolit ikamesinin mikro yapıda boşlukları azalttığını ve C-S-H jellerinin oluşumunda bir artış gözlemlemişlerdir [125].

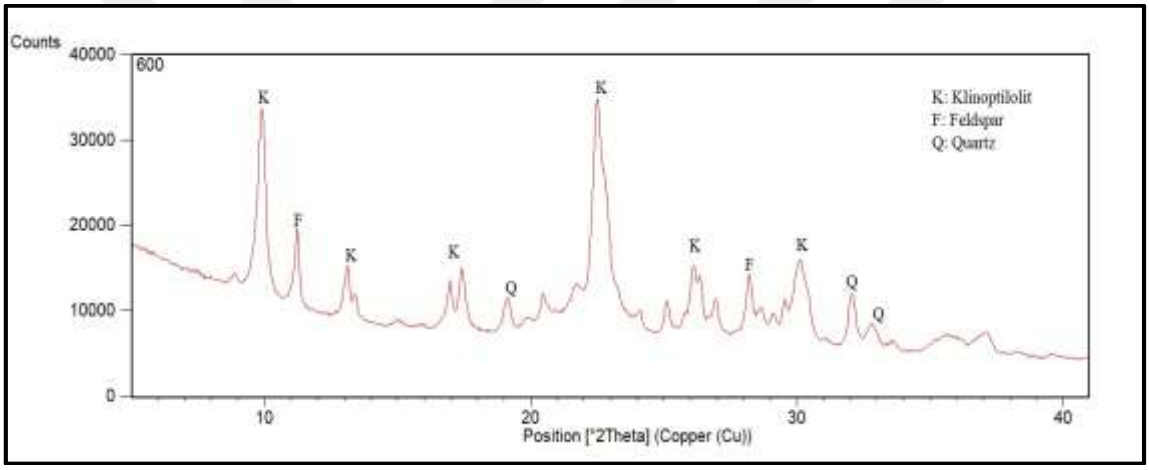
Zeolitin kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile reaksiyona girmesi, silisli veya silisli ve alüminyumlu malzemelerle hidrolik bağlayıcı özelliklere sahip C-S-H jellerinin oluşumuna yol açmaktadır. Yüksek SiO_2 içeriği, C_3S ve C_2S bileşiklerinin oluşumunu destekleyerek, puzolanik özelliklerin artmasına katkı sağlamakta ve ek C-S-H jellerinin oluşumuna yardımcı olmaktadır [126-130].

4.10.2. XRD analizi

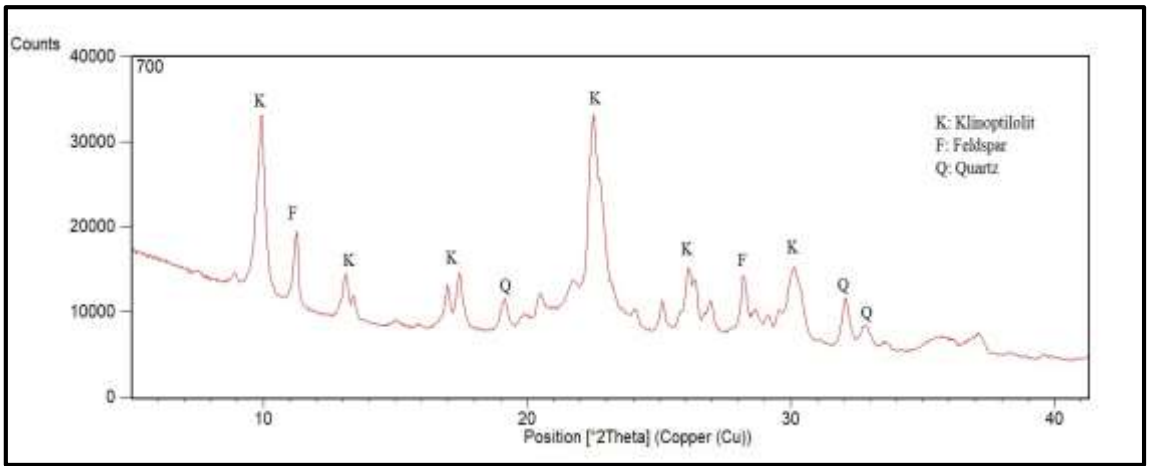
Doğal ve kalsinasyon işlemlerine tabi tutulan klinoptilolit zeolit örneklerinin X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.24-4.28'de verilmiştir.



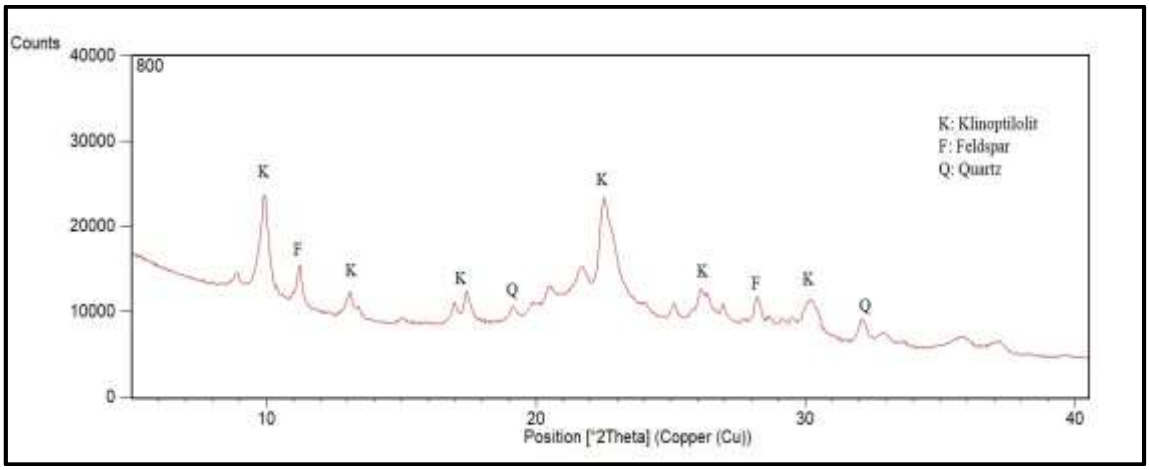
Şekil 4.24. Doğal zeolitin XRD analizi



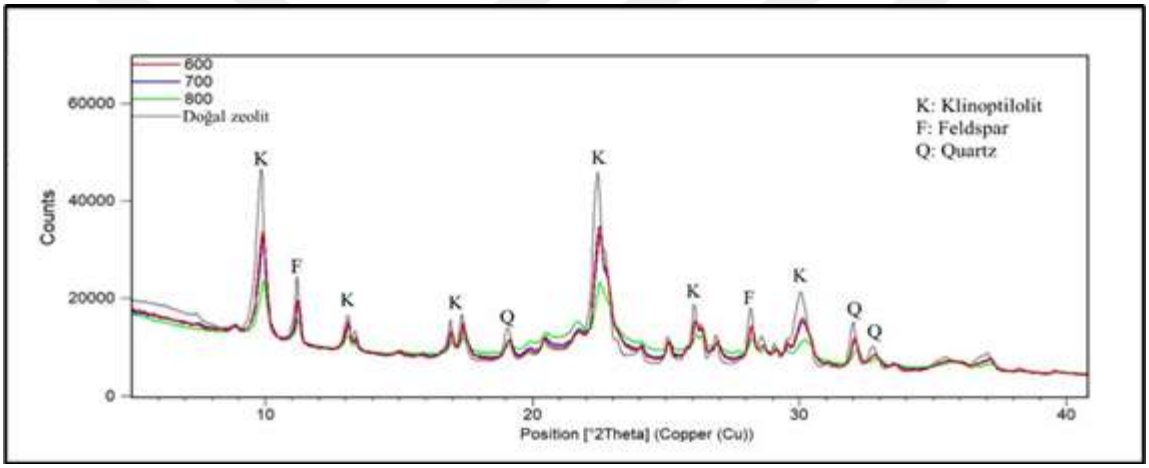
Şekil 4.25. 600 °C'de kalsine edilmiş zeolitin XRD analizi



Şekil 4.26. 700 °C'de kalsine edilmiş zeolitin XRD analizi



Şekil 4.27. 800 °C'de kalsine edilmiş zeolitin XRD analizi



Şekil 4.28. Doğal ve kalsine zeolitin XRD analizi

Doğal klinoptilolit zeoliti, keskin zirvelerle tanımlanan bir kristal yapıya sahiptir. XRD analizi, doğal zeolitin mineral bileşiminin yaklaşık %75-80 klinoptilolit, %10-15 kuvars ve %5-10 feldspat içerdiğini göstermektedir. X-ışını kırınım analizi, 2θ = 9,84°, 22,44°, 26,06° ve 30,07°'deki karakteristik dar ve yoğun zirvelerle, klinoptilolitin iyi kristalleşmiş yapısını ve bu zirvelerin karşılık gelen noktalarının konumlarını göstermektedir [131-133].

Kalsinasyon derecesinin artışıyla birlikte, klinoptilolit zirvelerinin yoğunluklarında kademeli bir azalma gözlemlenmiştir. Kalsinasyon sonrası elde edilen XRD deseninde, klinoptilolit zirvelerinin varlığı devam etmekle birlikte, zirvelerin yoğunluğunda belirgin bir azalma görülmekte ve bu durum kristal kafesinin büyük ölçüde çökmüş olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer araştırmalar da ısıl işlem sonrası klinoptilolitte benzer değişiklikler gözlemlemiştir [134-139].

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Bu çalışmada, çimento yerine farklı oranlarda doğal ve kalsine zeolit ikame edilerek üretilen harç numunelerinin dayanım, dayanıklılık ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda sunulmaktadır.

- Zeolitin çimentoya kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle, çimento yerine zeolit ikame edilen harçlarda zeolit içeriği arttıkça özgül ağırlıkta azalma gözlemlenmiştir.
- Zeolitin portland çimentosuna kıyasla daha küçük tanecik boyutuna sahip olması ve kalsinasyon işlemine tabi tutulması, puzolanik aktiviteyi artırarak harçlarda basınç dayanımı ve dayanıklılık özelliklerinde daha olumlu sonuçların elde edilmesine katkı sağlamıştır.
- 700 °C'de kalsine edilmiş %15 zeolit içeren numuneler, hem 7 günlük hem de 28 günlük basınç dayanımı kontrol numunesine ve doğal zeolit içeren numunelere kıyasla üstün performans sergilemiştir. Kontrol numunesine göre 7. günde yaklaşık %12, 28. günde ise yaklaşık %20 oranında basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir.
- %15 doğal zeolit içeren harçlar, 7. günde kontrol numunesi ile benzer sonuçlar göstermiştir. Ancak, 28. günde kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %12 oranında basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir.
- Ultrases geçiş hızı deneyinde, kalsine edilmiş zeolit eklenen harçlarda daha yüksek geçiş hızı değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, söz konusu harçların daha düşük gözenek içeriğine sahip olduğunu göstermektedir.
- Kapiler su emme deneyine göre, kılcallık katsayısı en yüksek değeri kontrol harcında, en düşük değeri ise kalsine edilmiş zeolit ikameli harçlarda gözlemlenmiştir. Bu sonuç, kalsine zeolit içeren harçların kılcal boşluklarının daha az olduğunu ve daha düşük geçirgenliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
- Klor iyon geçirgenliği deney sonuçlarına göre, kontrol harcı için 2959 coulomb, %15 zeolit ikameli harç için 739 coulomb ve 700 °C'de kalsine edilmiş %15 zeolit içeren numuneler için 600 coulomb değeri ölçülmüştür. Elde edilen veriler doğrultusunda, en düşük geçirgenlik değerinin kalsine edilmiş zeolit ikameli harç numunelerinde olduğu

belirlenmiştir. Bu doğrultuda, dayanıklılık açısından en iyi performansı 700 °C'de kalsine edilmiş %15 zeolit içeren numuneler sergilemiştir. Ayrıca, %15 zeolit ikameli harç numuneleri, kontrol harcına kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

- Deniz suyu ile yapılan ıslanma-kuruma çevriminde, kontrol harcı basınç dayanımının %10,12'sini kaybederken, zeolit ikameli harç %7,35, kalsine zeolit ikameli harç ise %6,45 oranında kayıp göstermiştir. %15 NaSO4 içeren suyla yapılan çevrimde, kontrol harcı basınç dayanımının %14,44'ünü kaybederken, zeolit ikameli harç %11,05, kalsine zeolit ikameli harç ise %9,85 oranında kayıp göstermiştir.
- Islanma-kuruma döngüleri sonucunda, farklı numunelerde gözlenen ağırlık kayıpları ile basınç dayanımı düşüşleri arasında doğrudan bir ilişki olduğu görülmüştür; ağırlık kaybı daha fazla olan numunelerde basınç dayanımındaki azalma da daha belirgin olmuştur. Deniz suyu ve sülfat ıslanma-kuruma çevrimlerinde, kalsine edilmiş zeolit içeren harçlarda, kontrol harcı ve doğal zeolit ikameli harçlara kıyasla daha düşük ağırlık kayıpları gözlemlenmiştir. Durabilite açısından, kalsine zeolit ikameli harçların daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.
- XRD analizleri, kalsinasyon işleminin klinoptilolit zirvelerinin yoğunluğunu azalttığını, kristal yapıyı bozduğunu ve yapıyı amorf hale dönüştürdüğünü ortaya koymuştur. Bu yapısal değişim sonucunda, harç numunelerinin dayanım ve durabilite özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir.

Elde edilen tüm bulgular doğrultusunda, 700°C'de kalsine edilmiş %15 zeolit içeren harçların hem dayanım hem de dayanıklılık açısından en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, kalsinasyon işlemiyle zeolitin puzolanik aktivitesinin artması ve harç içindeki mikro yapı gelişiminin iyileşmesiyle ilişkilendirilmiştir. Türkiye, zengin zeolit rezervlerine sahip olması nedeniyle bu doğal kaynağın çimento ikamesi olarak kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. Bu kapsamda, kalsine zeolitin yapı malzemelerinde değerlendirilmesi, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta hem de yerli kaynakların etkin şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Öneriler

- Türkiye, önemli zeolit rezervlerine sahip olması nedeniyle, bu doğal ve yerli kaynağın yapı malzemelerinde değerlendirilmesi çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilir. Bu

doğrultuda, zeolitin kullanım potansiyelinin artırılması amacıyla, kamu ve özel sektör iş birlikleriyle uygulamaya yönelik projeler geliştirilebilir ve bu alandaki çalışmaları teşvik edecek politikalar oluşturulabilir.

- Türkiye'de yaygın olarak bulunan diğer zeolit türlerinin (mordenit, analsim vb.) farklı sıcaklıklarda kalsinasyon sonrası harç performansına etkileri araştırılabilir.
- Kalsine zeolitin çimento ile birlikte başka puzolanlarla (uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi) kullanılarak harç performansı araştırılabilir.
- Doğal ve kalsine zeolit ikameli harç numunelerinde farklı s/ç oranları kullanılarak, mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenebilir.
- Kalsine zeolitin farklı öğütme inceliklerinde kullanımıyla, tane boyutunun mekanik özellikler ve mikro yapı üzerindeki etkisi değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Rodríguez-Camacho, R., Uribe-Afif, R. (2002). Importance of using the natural pozzolans on concrete durability. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1851-1858.

2. Papadakis, V., Tsimas, S. (2002). Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research,* 32(10), 1525-1532.

3. Lea, F., Desch, C. (1956). *The chemistry of cement and concrete* (Cilt 70). Londra: England: Edward Arnold Publishers Ltd, 127.

4. Poon, C.-S., Lam, L., Kou, S., Lin, Z. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials,* 13(8), 427-432.

5. Kurudirek, M., Özdemir, Y., Türkmen, İ., Levet, A. (2010). A study of chemical composition and radiation attenuation properties in clinoptilolite-rich natural zeolite from Turkey. *Radiation Physics and Chemistry,* 79(11), 1120-1126.

6. Ghafari, E., Feys, D., Khayat, K. (2016). Feasibility of using natural SCMs in concrete for infrastructure applications. *Construction and Building Materials*, 127, 724-732.

7. Sevim, U., Okumuş, N. (2016). Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların mekanik ve geçirimlilik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 26(2), 57-63.

8. Canpolat, O., Yılmaz, K., Köse, M., Sümer, M., Yurdusev, M. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research,* 34(5), 731-735.

9. Fragoulis , D., Chaniotakis, E., Stamatakis, M. (1997). Zeolitic tuffs of Kimolos Island, Aegean Sea, Greece and their industrial potential. *Cement and Concrete Research*, 27(6), 889-905.

10. Quanlin, N., Naiqian, F. (2005). Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction. *Cement and Concrete Research,* 35(9), 1784-1788.

11. Nas, M., Kurbetci, Ş. (2018). Mechanical, durability and microstructure properties. *Computers and Concrete,* 22(5), 449-459.

12. Köksal, F., Kocabeyoğlu, E., Gencel, O., Benli, A. (2021). The effects of high temperature and cooling regimes on the mechanical and durability properties of basalt fiber reinforced mortars with silica fume. *Cement and Concrete Composites,* 121(104107).

13. Gencel, O., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Benli, A., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials,* 294, 123607.

14. Gencel, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Sütçü, M., Elabade, W. (2021). Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials,* 291, 123374.

15. Snell, L., Snell, B. (2000). The early roots of cement. *Concrete International,* 22(2), 83-85.

16. Neville, A. (1996). *Properties of concrete: fourth and final edition.* (2nd Edition). New York: John Wiley.

17. Mills , A., Hayward, H., Rader , L. (1955). *Materials of construction.* (3nd Edition). New York: John Wiley & Sons Inc.

18. Popovics, S. (1992). *Concrete materials: Properties, specifications, and testing.* (3nd Edition). ABD: Noyes Publications.

19. Mindess, S., Young, J. (1981). *Concrete.* (2nd Edition). New Jersey: Prentice Hall, New Jersey. 657.

20. Taylor, P., Voigt, G. (2007). *Integrated materials and construction practices for concrete pavement: a state-of-the-practice manual*. United States: United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.

21. TS EN 197-1 (2012). Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar için bileşimler ve uygunluk kriterleri. *Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü*. 16-32.

22. Ceylan, S. (2007). *Mikronize edilmiş zeolit ikameli harçların ve betonların mühendislik özelliklerinin araştırılması.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

23. Güleç, A. (1992). *Bazı tarihi anıt harç ve sıvalarının incelenmesi.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

24. Uğur, T., Güleç, A. (2016). Harç, sıva ve diğer kompozit malzemelerde kullanılan bağlayıcılar ve özellikleri. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi,* (17), 77-91.

25. Van Balen, K., Papayianni, I., Van Hees, R., Binda, L., Waldum, A. (2005). Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. *Materials and structures*, 38(8), 781-785.

26. Frías, M., Ernesto, V.-C., Sánchez de Rojas, M., Valencia-Morales, E. (2005). The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: Application of a kinetic–diffusive model. *Cement and Concrete Research,* 35(11), 2137-2142.

27. Okucu, A. (1998). *Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzolanik özellikleri*. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

28. Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Öztürk, A. (2012). *Beton.* Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 334.

29. Erdoğan, S., Erdoğan, T. (2005). Puzolanların bağlayıcılık potansiyelinin romalılar tarafından keşfi ve romalılardan önce puzolan kullanımı. *Hazır Beton,* 1(3),50-52.

30. Davidovits, J. (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference? *Concrete International,* 9(12), 23-28.

31. Malinowski, R. (1979). Concretes and mortars in ancient aque-ducts. *Concrete International,* 1(1), 66-76.

32. Malinowski, R., Garfinkel , Y. (1991). Prehistory of concrete. *Concrete International.*

33. Cook, D. (1986). *Natural pozzolans.* Londra: Surrey University Press. 317.

34. Leckebush, R. (1984). Türkiye'de doğal puzolanların çimento katkı maddesi olarak kullanımı üzerine incelemeler. *Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi,* 2(3),1-10.

35. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, (2005). Madencilik Sektörü Raporu.

36. Malhotra, V. M. (1996). *Pozzolanic and cementitious materials*. (1nd Edition). Amsterdam: Gordon and Breach Publishers. 57.

37. Özbey, G., Atamer, N. (23-27 Nisan 1987). Kizelgur (Diatomit) hakkında bazı bilgiler. *10. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi Ankara,* 493-502.

38. Aruntaş, H. Y. (1996). *Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanabilirliği.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

39. Kaplan, H., Binici, H. (1995). Tras ve traslı çimentolar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 1(2), 121-127.

40. Dernek, C. (2022). *Determining the amount of pozzolans in Turkey and in the world to increase usability in cement systems in order to reduce carbon emissions.* Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

41. Sarıkaya, H. (2006). *Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

42. Yörükoğulları, E. (1985). *Güneş enerjisinin doğal zeolite depolanması.* Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

43. Öter, Ö. (2002). *Zeolitin asit-baz modifikasyonu ve modifiye zeolitin çevre koruma uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

44. Sand, L., Mumpton, F. A. (1976). *Natural zeolites: occurrence, properties and use*. (1nd Edition). New York: Pergamon Press. 149.

45. Karaüç, E. (2008). *Uçucu kül ve zeolitin kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

46. Küçükyıldırım, E. (2013). Kimyasal veya ısıl işlem görmüş klinoptilolit zeolitinin puzolanik aktivitesinin ve katkılı çimentolardaki performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

47. Breck, D.W. (1975). *Synthetic zeolites: Properties and applications, industrial minerals and rocks.* (1nd Edition). New York, USA: A.I.M.E. Press, 1243-1257.

48. Mumpton, F. A., Sheppard, R. (1974). Natural zeolites--their properties, occurrences, and uses. *Minerals Science and Engineering,* 6(1), 19-34.

49. Okumuş, N. (2012). *Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik ve geçirimlilik özellikleri*. Yüksek Lisan Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

50. Morrison, R.E. (1970). *A review of ash specifications*. Symposium of Fly Ash Utilization, 24-31

51. Bapat, J. D. (2013). *Mineral admixtures in cement and concrete. Abingdon*: (1nd Edition). Londra: CRC Press. 283.

52. Davis, R., Carlson, R., Kelly, J., Davis, H. (1937). Properties of cements and concretes containing fly ash. *Journal Proceedings,* 33(5), 577-612.

53. ASTM C618. (1994). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete*, PA: American Society for Testing and Materials.

54. Holland, T. C. (2005). Silica Fume User's Manual; Technical Report No. FHWA-IF05-016, *United States Silica Fume Association, Lovenstville, VA*. 212-234.

55. Malhotra, V. (1992). *Role of silica fume in concrete: a review.* (3nd Edition). Amsterdam: Elsevier Science. 432.

56. Mehta, P., Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials.* (1nd Edition). USA: McGraw-Hill Education. 371.

57. ASTM C1240. (2003). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitous Mixtures. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

58. İlter, E. (2007). *CEM I 42.5 Çimentolu yüksek dozajlı betonlarda silis dumanının etkinliği*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

59. Tokyay, M., Erdoğdu, K. (2002). *Cüruflar ve cüruflu çimentolar.* (1 Baskı). Ankara: TÇMB. 98.

60. Malhotra, V. (1993). Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Rice Husk Ash in Concrete: A Review. *Concrete International,* 15(4), 23-28.

61. Al-Akhras, N.M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research,* 36, 1727-1734.

62. Ramyar, K., İnan, G. (2007). Sodium sulfate attack on plain and blended cements. *Building and Environment,* 42, 1368-1372.

63. Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V., Lukić, I. (2017). Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials,* 152, 614-631.

64. Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., Chen, Z. (2017). Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction and Building Materials,* 147, 398-406.

65. Irassar, E.F., Di Maio, A., Batic, O.R. (1996). Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. *Cement and Concrete Research,* 26(1), 113-123.

66. Dehwah, H.A.F. (2007). Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates. *Construction and Building Materials,* 21, 29-39.

67. Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., Altun, İ.A. (2009). Portland kalkerli çimento bölüm II – sülfat dayanıklılığı, *İMO Teknik Dergi*, 310, 4737-4757.

68. Ustabaş İ. (2008). *Sülfat etkisine maruz mineral katkılı beton ve harçların performansının incelenmesi.* Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Trabzon.

69. Yalçın, H., Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*. (2 Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık. 406.

70. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite)*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282.

71. Küçükyıldırım, E., Uzal, B. (2014). Characteristics of calcined natural zeolites for use in high-performance pozzolan blended cements. *Construction and Building Materials,* 73, 229-234.

72. Burris, L., Juenger, M. (2020). Effect of calcination on the reactivity of natural clinoptilolite zeolites used as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials,* 258, 119988.

73. Dayı, M., Aruntaş , H., Çavuş, M., Şimşek, O. (2014). Zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 28(3), 491-499.

74. Yazıcıoğlu, Ö. F. (2016). *Çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilir üretimlerinde doğal zeolit'in (analsim) puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.

75. Poon, C., Lam, L., Kou, S., Lin, Z. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13-8, 427-432.

76. Uzal, B. (2007). *Properties and hydration of cementitious systems containing low, moderate, and high amounts of natural zeolites*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

77. Dığış, A. (2016). *Mineral katkı olarak kullanılan öğütülmüş doğal zeolitin harç özelliklerine etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

78. Chen, J., Ng, P., Kwan, A., Li, L. (2019). Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions. *Journal of Cleaner Production,* 210, 66-76.

79. Durgun, H. (2015). *Diatomit ve zeolit ikameli beton içerisindeki donatı korozyonunun elektrokimyasal empedans spestroskopisi yöntemi ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

80. Özen, S. (2013). *Pozolanic activity of natural zeolites: mineralogical, chemical, physical, characterization and examination of hydration product.* Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

81. Özer, C. (2018). *Geopolimer harçların reoloji davranışı üzerinde zeolit etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

82. Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., Franus, W. (2016). Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering,* 16, 554-562.

83. Tydlitát, V., Zákoutský, J., Černý, R. (2014). Early-stage hydration heat development in blended cements containing natural zeolite studied by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta,* 582, 53-58.

84. Yılmaz, İ. (2018). *Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit katkılı kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirlik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

85. Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites,* 32(2), 134-141.

86. Öcal, R. (2014). *Yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betonlar üzerindeki etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

87. Savaş, M. (2012). *Diatomit ve zeolit ikameli betonların kimyasal etkilere karşı davranışının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

88. Yıldız, K., Demirel , C. (2014). MgSO4 Etkisine Maruz Rijit Yol Kaplamalarında Pomza Ve Zeolit Katkılı Betonun Kullanılabilirliği. *Journal of Polytechnic,* 17(1), 23-29.

89. Jo, B.-W., Choi, J.-S., Yoon, K.-W., Park, J.-H. (2012). Material characteristics of zeolite cement mortar. *Construction and Building Materials,* 36, 1059-1065.

90. Feng, N., Li, G., Zang, X. (1990). High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture. *Cement, Concrete and Aggregates,* 12(2), 61-69.

91. Canpolat, F., Yılmaz, K. (2002). Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi Üniversite,* 15(2), 11-24.

92. Najimi , M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, 1023-1033.

93. Güldaş, M. (2018). *Zeolit katkılı çimento esaslı kompozitlerde kendi kendini temizleme ve antibakteriyel özelliklerin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

94. Khoshroo , M., Javid, A., Katebi, A. (2018). Effect of chloride treatment curing condition on the mechanical properties and durability of concrete containing zeolite and micro-nano-bubble water. *Construction and Building Materials*, 177, 417-427.

95. Chen, J., Li, L., Ng, P., Kwan, A. (2017). Effects of superfine zeolite on strength, flowability and cohesiveness of cementitious paste. *Cement and Concrete Composites,* 83, 101-110.

96. Karakurt, C. (2008). *Çimento üretiminde doğal zeolit ve volkanik tüflerin endüstriyel atıklarlarla birlikte kullanılmasının beton performansı üzerine etkileri*. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

97. Yıldırım, S. F. (2007). *Puzolanik zeolitin çimentoda katkı uygunluğunun araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

98. Bilim, V. (2018). The effect of sodium carbonate on elevated temperature resistance of cement mortars containing natural zeolite. *Turkish Journal of Engineering, 2*(1), 12-16.

99. Nas, M. (2015). *Zeolit ve metakaolin içeren betonların bazı dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

100. Ranjbar, M. M., Madandoust, R., Mousavi, S., Yosefi, S. (2013). Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete. *Construction and Building Materials,* 47, 806-813.

101. Mola Abasi, H., Shooshpasha, I. (2016). Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 8(5), 746-752.

102. Tuncel, S. G., Tugrul, S., Topal, T. (2007). A case study on trace metals in surface sediments and dissolved inorganic nutrients in surface water of Ölüdeniz Lagoon-Mediterranean, Turkey. *Water Research*, 41(2), 365-372.

103. TS EN 196-1 (2016). *Çimento deney metotları-Bölüm 1*: Dayanım tayini. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

104. TS EN 1015-3 (2002). Kagir harcı-deney metotları-Bölüm 3: taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

105. ASTM C597-02 (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. American Society for Testing And Materials, Philadelphia.

106. TS EN 1015-18 (2004) Kâgir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini. Ankara, Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü.

107. ASTM C1202 (2017). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

108. ASTM C157/C157M (2014). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. USA: ASTM Internation.

109. Guo, J.-J., Wang, K., Guo, T., Yang, Z.-Y., Zhang, P. (2019). Effect of Dry–Wet Ratio on Properties of Concrete Under Sulfate Attack. *Materials*, 12, 2755.

110. Neville, A.M. (2000). *Properties of concrete*, (Third Edition). New York: Longman Scientific and Technical, 137.

111. İnternet: Islanma Kuruma Çevrimi-Dinamik Elastisite Modülü İlişkisi. URL: https://eski.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/10146.pdf, Son Erişim Tarihi: 23.08.2025.

112. Sefıdehkhan, H., Şimşek , O. (2018). Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 83-91.

113. ASTM C1581/C1581M (2016). Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. USA: ASTM International.

114. Hewlett, P., Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete.* (Third Edition). Manchester: Butterworth-Heinemann. 98.

115. Gullu, B., Kadioglu, Y. (2017). Use of tourmaline as a potential petrogenetic indicator in the determination of host magma: CRS, XRD and PED-XRF methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* 183, 68-74.

116. Florez, C., Restrepo-Baena, O., Tobon, J. (2021). Effects of calcination and milling pre-treatments on natural zeolites as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 310, 125220.

117. Ramezanianpour, A., Kazemian, A., Sarvari, M., Ahmadi, B. (2013). Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low portland cement content and high durability. *Journal of Materials in Civil Engineering* , 25(5), 589-596.

118. Koçak, Y., Savaş, M. (2019). Zeolit ikameli betonlara sodyum klorürün etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 2094-2106.

119. Ceylan, S., Yazıcıoğlu, S., Turanlı, L. (2021). Usage of micronized zeolite in high performanced concrete. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 163-176.

120. Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 134-141.

121. Ramezanianpour, A., Mousavi, R., Kalhori, M., Sobhani, J., Najimi, M. (2015). Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes. *Construction and Building Materials*, 101(1), 347-358.

122. Ersoy, B., Yentürk, F., Arsoy, Z., Uygunoğlu, T. (2024). Puzolinik malzemelerin (dip külü ve zeolit) tane boyutunun harcın alkali-silika reaksiyonuna ve basınç dayanımına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 39(2), 977-992.

123. Snehal, K., Das, B. B. (2022). Pozzolanic reactivity and drying shrinkage characteristics of optimized blended cementitious composites comprising of Nano-Silica particles. *Construction and Building Materials*, 316, 125796.

124. Hu, X., Shi, Z., Shi, C., Wu, Z., Tong, B., Ou, Z., De Schutter, G. (2017). Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. *Construction and Building Materials,* 149, 406-415.

125. Li, H.-F., Ma, X., Zhang, G.-Z. (2023). Optimization of mortar self-healing performance-based on response surface methodology: A multifactor analysis of zeolites, crystalline admixtures, and water-to-binder ratio. *Construction and Building Materials*, 409, 134015.

126. Kop, M., Yazıcıoğlu, S. (2024). Kalsine edilmiş doğal zeolit ikameli harçların mühendislik özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1(1), 23-41.

127. Demir, İ., Sevim, Ö., Özel, G., Doğan, O. (2020). Microstructural, physical and mechanical properties of aerated concrete containing fly ash under high temperature and pressure. *Revista Română de Materiale/Romanian Journal of Materials,* 50(2), 240-249.

128. Demir, İ., Sevim, Ö., Kalkan , İ. (2018). Microstructural properties of lithium-added cement mortars subjected to alkali–silica reactions. *Sādhanā,* 43(7), 1-10.

129. Şimşek, O., Aruntaş, H., Demir, İ., Yaprak, H., Yazıcıoğlu , S. (2022). Investigation of the effect of seawater and sulfate on the properties of cementitious composites containing silica fume. *Silicon*, 2(4),1-13.

130. Güzelküçük, S., Demir, İ., Sevim, Ö., İlker, K. (2020). Mechanical properties and microstructure of cement multicomponent systems containing pozzolan materials under sulfate attack. *Cement Wapno Beton*, 25, 137-153.

131. Petrov, O. E, Ming, D. W., Mumpton, F. A. (1995) Cation exchange in clinoptilolite: an X-ray powder diffraction analysis. *Natural Zeolites*, 93,271-279.

132. Korkuna, O., Lèboda, R., Skubiszewska-Zięba, J., Vrublevs'ka, T., Gun'ko, V., Ryczkowski, J. (2006). Structural and physicochemical properties of natural zeolites: clinoptilolite and mordenite. *Microporous and Mesoporous Materials,* 87(3), 243-254.

133. Nezamzadeh-Ejhieh, A., Moeinirad, S. (2011). Heterogeneous photocatalytic degradation of furfural using NiS-clinoptilolite zeolite. *Desalination,* 273(2-3), 248-257.

134. Christidis, G., Moraetis, D., Keheyan, E., Akhalbedashvili, L., Kekelidze, N., Gevorkyan, R., Sargsyan, H. (2003). Chemical and thermal modification of natural HEU-type zeolitic materials from Armenia, Georgia and Greece. *Applied Clay Science,* 24(1-2), 79-91.

135. Duvarcı, Ö., Akdeniz, Y., Özmıhçı, F., Ülkü, S., Balköse, D., Çiftçioğlu, M. (2007). Thermal behaviour of a zeolitic tuff. *Ceramics International,* 33(5), 795-801.

136. Alver, B., Dikmen, G., Alver , Ö. (2019). The analyses of the effect of heat treatment on the structural properties of zeolites from turkey using ft-ir, mas nmr and xrd methods. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering,* 20(4), 474-480.

137. Dimowa, L., Petrov, S., Shivachev, B. (2013). Natural and Zn exchanged clinoptilolite: in situ high temperature XRD study of structural behavior and cation positions. *Bulgarian Chemical Communications,* 45(4), 466-473.

138. Akkoca, D., Yılgın, M., Ural, M., Akçin, H., Mergen , A. (2013). Hydrothermal and thermal treatment of natural clinoptilolite zeolite from Bigadiç, Turkey: An experimental study. *Geochemistry International,* 51, 495-504.

139. Albayrak, M., Yörükoğlu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Aruntaş, H.Y., Girgin, İ. (2007). Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Building and Environment,* 42(9), 3161-3165.



Gazili olmak ayrıcalıktır