



**T. C.**

**ORDU ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANALSİM VE KLİNOPTİLOLİT KATKILI ÇİMENTOLAR  
İÇEREN HAFİF HARÇ PLAKALARIN ISIL  
PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ**

**ALİ RIZA YAMAK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI**

**ORDU 2021**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kullanılan intihal tespit programının sonuçlarına göre; bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

**ALİ RIZA YAMAK**

**Bu çalışma Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün D-2101 numaralı projesi ile desteklenmiştir.**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

### ANALSİM VE KLİNOPTİLOLİT KATKILI ÇİMENTOLAR İÇEREN HAFİF HARÇ PLAKALARIN ISIL PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

ALİ RIZA YAMAK

ORDU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ, 73 SAYFA

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ YASEMİN AKGÜN)

Günümüzde, yapı malzemelerinin termal performansları üzerindeki çalışmalar enerji odaklı hedeflere yönelik olarak giderek yaygınlaşmaktadır. Köpük harç ve betonlar bu yapı malzemelerindedir. Bu deneysel çalışmada, iki farklı doğal zeolit minerali olan analsim ve klinoptilolit içeren katkılı çimento kullanılarak üretilen hafif hamur ve harç plakaların termal performansları incelenmiştir. Çalışmada üretilen plakaların fiziksel, mekanik ve termal özellikleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardaki hafif hamur ve harç plakalar farklı zeolit yer değiştirme oranlı (%0, %10, %30 ve %50) katkılı çimentolar ile üretilmiştir. Üretilen deney serilerinden elde edilen sonuçlar, kendi aralarında ve birbirleri ile olmak üzere karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın amacı; birbirine alternatif iki farklı doğal zeolit (analsim ve klinoptilolit) katkı ve eşit oranda köpük ajanı kullanılarak üretilen hafif hamur ve harç plakaların termal performans ve dayanım açısından yapı malzemesi olarak kullanım avantajlarını belirlemektir. Ayrıca, piyasada kullanılan köpük betonun üretim maliyetini düşürmek için bu çalışmada alternatif katkı olarak önerilen analsim ve klinoptilolit katkıları için veri oluşturmaktır.

Elde edilen test sonuçlarına göre, her iki zeolit katkı maddesinin mukavemet ve ısı performansları açısından değerlendirilmiş, her iki zeolit katkı maddesinin %10 yer değiştirme oranında kullanılmasıyla üretilen plakaların ısı performanslarının, piyasada giderek yaygınlaşmakta olan köpük beton uygulamaları için, iyileştirilebileceği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Analsim, Klinoptilolit, Hafif Harç Plaka, Dayanım, Termal Performans

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF THERMAL PERFORMANCES OF LIGHTWEIGHT MORTAR PLATES CONTAINING ANALCIME AND CLINOPTILOLITE BLENDED CEMENTS

ALİ RIZA YAMAK

ORDU UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED  
SCIENCES

RENEWABLE ENERGY

MSC. THESIS, 73 PAGES

**SUPERVISOR: ASST. PROF. YASEMİN AKGÜN**

Nowadays, studies on the thermal performance of building materials are becoming increasingly common for energy-focused targets. Foamed mortar and concrete are among these building materials. In this experimental study, the thermal performances of lightweight paste and mortar plates produced using blended cement with additives containing two different natural zeolite minerals, analcime and clinoptilolite, were investigated. The physical, mechanical, and thermal properties of the plates produced in the study were determined. Lightweight paste and mortar plates in experimental studies were produced by blended cements with different zeolite replacement ratios (0%, 10%, 30% and 50%). The results obtained from the produced test series were compared among themselves and with each other.

The aim of the study to determine the advantages of using lightweight paste and mortar plates produced by using two natural zeolite (analcime and clinoptilolite) that are alternative additives to each other and foaming agent at equal ratios as a building material in terms of thermal performance and strength. In addition, it is to provide data for analcime and clinoptilolite additives, which are suggested as alternative additives in this study to reduce the production cost of foamed concrete used in the market.

According to the test results obtained, it was evaluated in terms of the strength and thermal performances of both zeolite additives, it is seen that the thermal performances of plates produced by using of both zeolite additives at 10% replacement ratio can be improved for foamed concrete applications, which are becoming increasingly common in the market.

**Keywords:** Analcime, Clinoptilolite, Lightweight Mortar Plate, Strength, Thermal Performance.

## TEŞEKKÜR

Tez konunun belirlenmesi, çalışmanın yürütülmesi ve yazımı esnasında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sayın Yasemin AKGÜN' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada deney numunelerinin üretiminde kullanılan malzemeleri sağladığı için Altaş Hazır Beton A.Ş' ye, köpük ajanının temininde yardımcı olan İnşaat Mühendisi Sayın Abdullah UÇAR' a ve numunelerin termal performanslarının belirlenmesinde deneylerin yapımında yardımlarını esirgemeyen Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sayın Askeri KARAKUŞ' a teşekkür ederim.

Tez yazım aşamasında manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan büyükbabam Ahmet SOYMAN' a, anneannem Rabia SOYMAN' a ve dayılarım Adem SOYMAN ile Zeki SOYMAN' a minnettarlığımı sunarım. Aynı zamanda, maddi ve manevi desteklerini her an üzerimde hissettiğim babam, annem ve ablama teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	I
<b>ÖZET</b> .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	IV
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	V
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	VII
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	IX
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	X
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	3
2.1 Puzolanlar.....	3
2.2 Puzolanların Sınıflandırılması.....	5
2.2.1 Doğal Puzolanlar.....	5
2.2.2 Yapay Puzolanlar.....	6
2.3 Puzolanik Aktivite.....	9
2.4 Doğal Puzolan Zeolitlerin Isıl Performansları.....	10
2.5 Termal (Isıl) Performansı Etkileyen Parametreler.....	12
2.5.1 Özgül Ağırlık.....	12
2.5.2 Özgül Isı.....	13
2.5.3 Isı Kapasitesi.....	13
2.5.4 Isıl İletkenlik Katsayısı.....	13
2.5.5 Isıl Yayımlama Katsayısı.....	14
2.6 Köpük Harç ve Betonlar.....	14
<b>3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	16
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	23
4.1 Materyal.....	23
4.1.1 Portland Çimentosu.....	23
4.1.2 Doğal Zeolitler.....	23
4.1.3 CEN (European Committee for Standardization) Standard Kumu.....	24
4.1.4 Köpük Ajanı.....	25
4.1.5 Karışım Suyu.....	26
4.2 Yöntem.....	27
4.2.1 Deneylede Kullanılan Malzemelerin Fiziksel, Kimyasal ve Minerolojik- Petrografik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	27
4.2.2 Zeolitlerin Puzolanik Aktivite Deneyleleri ve Numunelerin Hazırlanışı.....	28
4.2.3 Hamur ve Harç Plakalar Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Yöntemleri.....	28
4.2.3.1 Hamur ve Harç Plakaların Bileşimleri.....	28
4.2.3.2 Hamur ve Harç Plakaların Üretimi ve Saklama Koşulları.....	30
4.2.3.3 Mini Çökme (Slump) ve Yayılma Deneyi.....	38
4.2.3.4 Özgül Ağırlık Deneyi.....	39
4.2.3.5 Su Emme Oranı Tespit Deneyi.....	39
4.2.3.6 Termal (Isıl) Performans Tespit Deneyleleri.....	40
4.2.3.7 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Tayini Deneyi.....	40
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	42
5.1 Portland Çimentosu ve Doğal Zeolitlerin Özellikleri.....	42

5.1.1 Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	42
5.1.2 Mineralojik ve Petrografik Özellikleri.....	43
5.1.3 Doğal Zeolitlerin Puzolanik Aktiviteleri.....	46
5.2 Hafif Hamur Plaka Numunelerine Ait Bulgular ve Tartışma .....	47
5.2.1 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık, Su Emme ve Mini Slump Değerleri .....	47
5.2.2 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Ultrasonik Ses Geçiş Hızları .....	51
5.2.3 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Termal (Isıl) Performansları .....	53
5.3 Hafif Harç Plaka Numunelerine Ait Bulgular ve Tartışma.....	55
5.3.1 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık, Su Emme ve Mini Slump Değerleri .....	55
5.3.2 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Ultrasonik Ses Geçiş Hızları.....	59
5.3.3 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Termal (Isıl) Performansları .....	61
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>65</b>
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>68</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>73</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1	Puzolanların Sınıflandırılması (Ün, 2007).....	5
Şekil 2.2	Yüksek Fırın Cürufu Oluşumu .....	8
Şekil 2.3	Zeolit Molekülünün Yapısı (Şahin, 2014) .....	11
Şekil 2.4	Zeolit Yapısının Ana Yapıtışı Düzgün Dörtüzlü (Beşergil, 2018) .....	11
Şekil 4.1	Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Klinoptilolit.....	24
Şekil 4.2	Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Analsim .....	24
Şekil 4.3	Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan CEN Kumu .....	25
Şekil 4.4	Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Neopor Köpük Ajanı.....	26
Şekil 4.5	Deneylerde Kullanılan Hassas Terazi .....	30
Şekil 4.6	Portland Çimentosu ve Doğal Zeolit Karışımı .....	31
Şekil 4.7	Numunelerin Kıvamına İlişkin Görünüm.....	32
Şekil 4.8	Köpük Ajanı ile Oluşturulmuş Köpük.....	32
Şekil 4.9	Hamur ve Harç Karıştırma Cihazı .....	33
Şekil 4.10	Köpük İlaveli Hamur ve/veya Harç Karışımı.....	33
Şekil 4.11	Hamur ve/veya Harç Plaka Kalıpları (20x60x150 mm) .....	34
Şekil 4.12	Plaka Kalıba Yerleştirilmiş Hamur ve/veya Harç Numunesi .....	34
Şekil 4.13	Hamur ve/veya Harç Numunesinin Küp Kalıba Yerleştirilme Anı.....	35
Şekil 4.14	Küp Kalıba Yerleştirilmiş Hamur ve/veya Harç Numunesi .....	35
Şekil 4.15	İsmlendirilmiş Hamur ve/veya Harç Numuneleri .....	36
Şekil 4.16	Deney Numunesinin Kalıptan Çıkarılması.....	37
Şekil 4.17	Numunelere Ait Genel Bir Görünüm .....	37
Şekil 4.18	Deney Anındaki Şişleme İşlemi .....	38
Şekil 4.19	Deney Anındaki Yayılma Miktarının Ölçümü .....	38
Şekil 4.20	Deneylerde Kullanılan Özgül Ağırlık Sehпасı.....	39
Şekil 4.21	Termal Performans Ölçümlerinin Yapıldığı Cihaz .....	40
Şekil 4.22	Ultrasonik Hız Devresinin Şematik Diyagramı (Tarun ve ark., 2004)....	41
Şekil 4.23	UPV Ölçüm Cihazı ve Deney Numunesi .....	41
Şekil 5.1	Deneylerde Kullanılan Klinoptilolit Numunesinin XRD Pikleri .....	44
Şekil 5.2	Deneylerde Kullanılan Klinoptilolit Örneğinin SEM Görüntüsü.....	44
Şekil 5.3	Deneylerde Kullanılan Analsim Numunesinin XRD Pikleri.....	45
Şekil 5.4	Deneylerde Kullanılan Analsim Örneğinin SEM Görüntüsü .....	46
Şekil 5.5	Hafif Hamur Plaka Numunelerinin DKY ve Kuru Özgül Ağırlık Değerleri .....	48
Şekil 5.6	Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Su Emme Değerleri .....	49
Şekil 5.7	Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Mini Slump Deney Sonuçları Değişimleri .....	50
Şekil 5.8	Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı Değişim Grafiği .	52
Şekil 5.9	Hafif Hamur Plaka Numunelerin Isıl İletkenlik Katsayı-Özgül Ağırlıkları	54
Şekil 5.10	Hafif Hamur Plaka Numunelerin Özgül Isı-Özgül Ağırlıkları .....	54
Şekil 5.11	Hafif Harç Plaka Numunelerinin DKY ve Kuru Özgül Ağırlıkları.....	56
Şekil 5.12	Hafif Harç Plaka Numunelerinin Su Emme Değerleri .....	57
Şekil 5.13	Hafif Harç Plaka Numunelerinin Mini Slump Deney Sonuçları Değişimleri .....	58
Şekil 5.14	Hafif Harç Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı Değişim Grafiği...	60



<b>Şekil 5.15</b> Hafif Harç Plaka Numunelerin Isıl İletkenlik-Özgül Ağırlıkları.....	62
<b>Şekil 5.16</b> Hafif Harç Plaka Numunelerin Özgül Isı-Özgül Ağırlıkları .....	63

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> Portland Çimentosu ve Yapay Puzolanların Özgül Yüzey Alanları (Şimşek, 2012).....	6
<b>Çizelge 2.2</b> Doğal Puzolanların Sahip Olması Gereken Kimyasal Özellikler.....	10
<b>Çizelge 2.3</b> Köpük Betonun Özgül Ağırlığına Göre Uygulanma Şekilleri .....	15
<b>Çizelge 4.1</b> CEN Standart Kumu Tane Boyut Dağılımı .....	25
<b>Çizelge 4.2</b> Neopor Köpük Ajanı Fiziksel Özellikleri.....	26
<b>Çizelge 4.3</b> Karışım Suyuna Ait Ocak Ayı Analiz Raporu .....	27
<b>Çizelge 4.4</b> Deneylerde Kullanılan Malzeme Miktarları .....	28
<b>Çizelge 4.5</b> Hamur ve Harç Plakalara Ait Açıklayıcı Bilgiler.....	29
<b>Çizelge 4.6a</b> Hamur Plakalara Ait Bileşimler (1 m <sup>3</sup> için).....	29
<b>Çizelge 4.6b</b> Harç Plakalara Ait Bileşimler (1m <sup>3</sup> İçin) .....	30
<b>Çizelge 5.1</b> Portland Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	42
<b>Çizelge 5.2</b> Portland Çimentosu ve Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri .....	42
<b>Çizelge 5.3</b> Doğal Zeolit Klinoptilolit ve Analsim' in Kimyasal Özellikleri .....	43
<b>Çizelge 5.4</b> Klinoptilolit Numunesinin Mineralojik ve Petrografik Bileşimi.....	43
<b>Çizelge 5.5</b> Zeolitlerin Puzolanik Aktivite Değerleri (Akgün ve Yazıcıoğlu, 2020)	47
<b>Çizelge 5.6</b> Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri .....	48
<b>Çizelge 5.7</b> Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Mini Slump Değerleri .....	49
<b>Çizelge 5.8</b> Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızları .....	51
<b>Çizelge 5.9</b> Hafif Hamur Plaka Numunelerin Termal Performans Değerleri.....	53
<b>Çizelge 5.10</b> Hafif Harç Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri .....	56
<b>Çizelge 5.11</b> Hafif Harç Plaka Numunelerinin Mini Slump Deney Sonuçları .....	57
<b>Çizelge 5.12</b> Hafif Harç Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı .....	60
<b>Çizelge 5.13</b> Hafif Harç Plaka Numunelerin Termal Performansları.....	62

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

---

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum Oksit
<b>ASTM</b>	: American Society of Testing Materials
<b>C</b>	: Isı Kapasitesi
<b>CaO</b>	: Kalsiyum Oksit
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	: Kalsiyum Hidroksit
<b>CEN</b>	: The European Committee for Standardization
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>c<sub>p</sub></b>	: Özgül Isı
<b>cps</b>	: Centepoise
<b>DIN</b>	: Alman Standartlar Enstitüsü
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Demir Oksit
<b>GYFC</b>	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
<b>ISO</b>	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
<b>k</b>	: Isıl İletkenlik Katsayısı
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>m</b>	: Kütle
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>NO<sub>2</sub></b>	: Azot Dioksit
<b>pH</b>	: Power of Hydrogen
<b>q</b>	: Isı Akısı
<b>Q</b>	: Toplam Isı
<b>SEM</b>	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Dioksit
<b>SO<sub>3</sub></b>	: Kükürt trioksit
<b>TG-DTA</b>	: Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz
<b>TS EN</b>	: Türk Standartları Avrupa Normları
<b>UPV</b>	: Ultrasonic Pulse Velocity
<b>V</b>	: Toplam Hacim
<b>W</b>	: Toplam Ağırlık
<b>XRD</b>	: X Işını Kristalografisi
<b>XRF</b>	: X Işını Floresansı
<b>ΔL</b>	: Kalınlık Farkı
<b>ΔT</b>	: Sıcaklık Farkı
<b>α</b>	: Isıl Yayınım Katsayısı
<b>ρ</b>	: Özgül Ağırlık

---

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış insanlığın enerjiye olan ihtiyacını gün geçtikçe artırmıştır. Bu enerji ihtiyacı karşısında fosil kaynaklara bağımlı olunması günümüzde önlem alınması gereken bir hal almıştır.

Birleşmiş Milletlerin 2019 yılında yayımlanan dünya nüfusu beklenti raporuna göre, 2030 yılında dünya nüfusu 8.5 milyara, 2050 yılında 9.7 milyara ve 2100 yılında ise 10.9 milyara ulaşacağı öngörülmektedir. Dünya nüfusundaki bu artışa bağlı enerji ihtiyacının sürekli artması karşısında enerji kaynaklarının sınırlı ve üretiminin maliyetli oluşu ile çevresel kaygılar insanlığın enerjiyi optimum şekilde kullanmasını ve sürdürülebilir alternatif enerji kaynaklarına yönelmesini sağlamıştır.

Enerjinin üretilmesi ve tüketilmesi dünya genelinde ekonomik kalkınmanın tüm aşamasında enerjinin korunması ile verimli kullanılmasında hayati bir öneme sahiptir. Global enerji tüketimi ekonomik ve çevresel gelişim ile bağlantılıdır. Bu sebeple enerji tüketimi faktörü enerji tasarruflu ve verimli sistemlerin tasarımını ve çevresel faktörleri dikkate almayı zorunlu kılmaktadır. Ekonomik gelişime bağlı olarak enerjinin temel tüketim alanları yapılaşma ve çevresel gelişim, ticari, endüstri, ulaşım ve konutlarda gerçekleşmektedir. Son yıllarda yapılaşmaya olan talep hızla artmakta ve bu talebin karşılanabilmesi için yapılan çok büyük ebattaki binalar enerji tüketimi üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır (Paremeshwaran ve ark., 2012).

Uluslararası Enerji Ajansının 2020 yılında yayımladığı rapora göre sektörel bazda dünya enerji tüketiminin %38 sanayi, %29 ulaşım, %21 konutlar, %8 ticaret ve kamu hizmetleri, %2 tarım ve diğer %2'si ise diğer sektörler tarafından tüketilmektedir. Bu nedenle konutların enerji tüketiminde ve karbon salınımında yüksek paya sahip olması enerji verimliliği ve çevre açısından dikkate alınması gereken bir konudur.

Binalarda kullanılan enerjinin önemli bir bölümü sağlıklı yaşam standartlarının sağlanması amacıyla binaların ısıtılması ve soğutulması için tüketilmektedir. Bu nedenle son zamanlarda bina enerji tüketimlerinin kontrol altına alınabilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle binalara enerji kimlik belgesi verilmekte böylece enerji tüketimi azaltılmaya ve yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanılması teşvik edilmeye çalışılmaktadır (Utlü, 2013).

Günümüzde binaların inşasında yoğun şekilde kullanılan betonun girdilerinden olan Portland çimentosunun üretiminde enerji tüketiminin yüksek olması ve ekolojik yönden zararlı CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> gibi gazların salınımının yüksek olması insanları farklı arayışlara yönlendirmiştir. Dünyada meydana gelen CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %5-10'u çimento klinkeri üretimi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, çimento üretiminde farklı yer değiştirme oranlarında bünyesinde puzolan özellikli mineral katkı içeren çimento üretimi ekonomik ve çevresel açıdan daha iyi bir noktaya getirilme çabası içerisindeyiz. Bunun yanı sıra puzolan katkılı çimentolar nihai ürün olan harç ve betonun dayanım ve dayanıklılık performanslarını iyileştirmektedir.

Bu çalışmada, doğal ve yerel puzolanlardan olan zeolit grubu analsim ve klinoptilolit Portland çimentosu ile farklı yer değiştirme oranlarında (%0, %10, %30, %50) kullanılarak katkılı çimentolar elde edilmiştir. Yer değiştirme malzemesi olan zeolitler üzerinde fiziksel, kimyasal ve mineralojik-petrografik, katkılı çimentolar üzerinde fiziksel, hafif hamur ve hafif harç plaka numuneleri üzerinde ise fiziksel, mekanik ve ısı (termal) özellik tespit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen deney serilerinden elde edilen sonuçlar, hem kendi aralarında hem de birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın öncelikli amacı, analsim ve klinoptilolit katkılı çimentolar içeren hafif hamur ve hafif harç plakaların ısı performanslarının belirlenmesidir. Diğer bir amacı ise, piyasada mevcut olan mineral katkı çeşitliliğine klinoptilolite alternatif olarak analsim katkı için teknik veri sağlamaktır. Böylelikle zeolit katkılı çimento ile üretilen hafif plakaların yapılarda ısı performansına yönelik teknik veri elde edilmesi amaçlanmaktadır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Puzolanlar

Puzolanlar tek başlarına bağlayıcılığı olmayan ya da çok az miktarda olan fakat çok ince öğütülmüş halde sulu ortamda iken kalsiyum hidroksit ile birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silika ve alumina içerikli malzemelerdir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Puzolanların bağlayıcı özellikte kullanımı çok eski tarihlere dayanmaktadır. Puzolan kelimesi Romalılar döneminde Napoli yakınlarındaki Puzzuoli kasabasından gelmektedir. Romalılar Puzzuoli kasabası civarındaki Vezüv yanardağının etkisi ile volkanik kül barındıran toprağı ve yüksek sıcaklıkta pişirdikleri kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek bağlayıcı özelliği olan hamurlar elde etmişlerdir. Ayrıca bu hamurlara taşlar yerleştirerek günümüzde yaygın bir şekilde kullandığımız betona benzer malzemeler üretmişlerdir (Erdoğan, 2003).

Anadolu'da ise Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı yapılarında kullanılan Horasan Harcı, kilden üretilen ve pişirilen tuğla, kiremit ve çömlek gibi malzemelerin inceltirilerek söndürülmüş kireçle karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. İstanbul'da bulunan Ayasofya Cami, Topkapı Sarayı, Sultanahmet Külliyesi ile Anadolu'da bulunan Cacabey Medresesi, İnce Minareli Medrese ve Alaeddin Cami horasan harcı ile yapılan tarihi yapılardan sadece birkaçıdır.

Puzolanlar suyla temas ettiğinde güçlü bir hidrolik harç oluşturması sebebiyle hamam, su kanalı, köprü gibi neme maruz kalan yapılarda sıklıkla tercih edilmiştir.

Puzolanlar, bünyesinde reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer oksitleri barındırmaktadır. Puzolanların iyi bir bağlayıcı özellikte olabilmeleri için (Erdoğan, 2004):

- Bünyesinde ihtiva ettiği silika ve alümina değeri yüksek olmalıdır ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri minimum %70 olmalıdır).
- Bünyesinde bulunan  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  şekilsiz biçimde yer almalıdır.
- Öğütülerek çok ince taneli bir biçimde olmalıdır.
- Bünyesinde bulundurduğu reaktif  $\text{SiO}_2$  ağırlıkça %25'ten az olmamalıdır.

Puzolanların doğal oluşumlu olanları volkanik kaynaklı iken yapay oluşumlu olanları sanayi atıklarından elde edilmektedir. Ülkemizde volkanik oluşumlu olan doğal puzolanlara tras denilmektedir.

Ülkemiz jeolojik olarak genç oluşumlu yapıya sahip olması nedeniyle birçok volkanik dağa ve bu dağlardan yayılan volkanik malzemelerin biriktiği arazilere sahiptir. Bu durum ülkemizin zengin tras yataklarına sahip olmasına neden olmuştur.

Ülkemizde 20. yy.ın ortalarından itibaren Portland çimentosu, puzolanlar ile birlikte kullanılmaya başlamıştır. Bu durum, beton üretiminde çevreye olan zararı, maliyeti ve enerji tüketimini azaltmıştır. Ayrıca puzolanların çimentoda ikame malzemesi olarak kullanımı birçok olumlu sonuçlar vermiştir.

Puzolan ikame edilmiş Portland çimentosu suyla temas ettiğinde önce Portland çimentosu hidratasyona başlamaktadır. Bunun sonucunda kalsiyum hidroksit ve kalsiyum-silika-hidrat ürünleri ortaya çıkmaktadır. Katkı maddesi olarak bulunan puzolanlar ise kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek bağlayıcı nitelikteki kalsiyum-silika-hidrat ürünlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, puzolanlar betonda hidratasyon ısını düşürerek oluşacak rötne çatlaklarının azalmasına böylece betondaki geçirimsizliğin azalmasına ve beton ömrünün uzamasına neden olmaktadır.

Puzolanlar çok ince taneli olduğundan özgül yüzey alanları Portland çimentosuna göre fazladır. Bu durum özgül ağırlıklarının Portland çimentosuna göre daha düşük olmasına neden olmakta ve birlikte kullanıldığında hamur hacminin artmasını sağlamaktadır. Böylece betonda işlenebilirlik artmakta ve yerleştirme masrafları azalmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

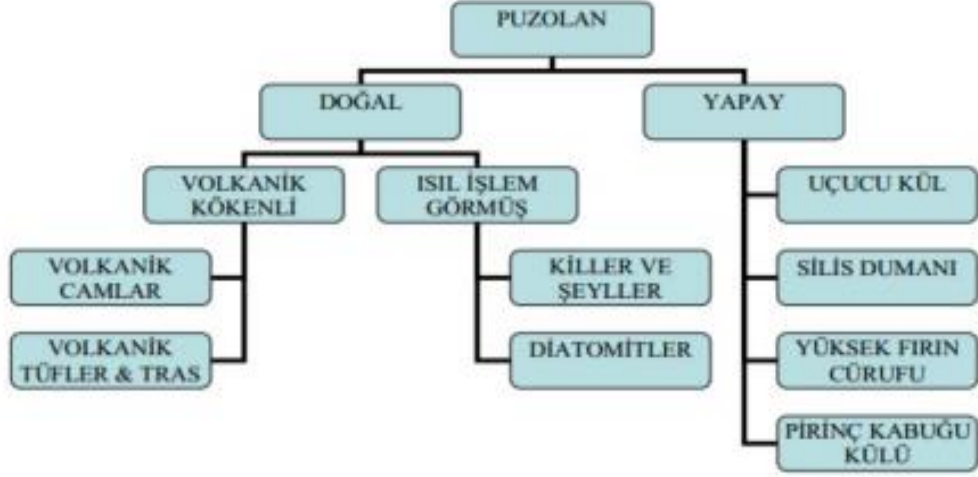
Puzolanların özgül yüzey alanlarının fazla olması betonda yer alan boşlukların azalmasına dolayısıyla suyla temas ettiğinde geçirimsizliğin az olmasını sağlamaktadır. Bu durum betonarme demirinin korozyondan korumasını sağlamaktadır. Ayrıca, puzolanlar çok ince granülometriye sahip olduğundan betonun bünyesinde bulunan suyu hapsederek terlemenin azalmasını sağlamaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Puzolan katkılı betonlarda Portland çimentosunun miktarının azaltılması beton bünyesinde yer alan trikalsiyum alüminat anabileşenlerini ve alkalileri azaltmaktadır. Böylece, betonun sülfat direncinin artmasına ve alkali-agrega tepkimesi sonucu

oluşacak genleşme ihtimalinin azalmasını sağlamaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

## 2.2 Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması (Ün, 2007).

### 2.2.1 Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar dünya üzerinde kendiliğinden oluşan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir.

Doğal puzolanlar kendi aralarında volkanik kaynaklı puzolanlar ve ısıtılma tabii tutulmuş puzolanlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Volkanik kaynaklı doğal puzolanlar, bünyesinde alüminli silika içeren erimiş malzemelerin yanardağlardan dışarı püskürmesi ile oluşur. Püskürme sonucu lavlar dışarı çıkarken alanda gazların olması malzemelerin boşluklu yapıda olmasına ve büyük özgül yüzey alanları kazanmasına yol açmaktadır (Ün, 2007).

Yanardağdan çıkan eriyik malzemelerin hızlı püskürmesi neticesinde puzolanik etkinliği fazla camsı malzemeler meydana gelirken, yavaş püskürmesi neticesinde ise puzolanik etkinliği daha az olan volkanik traslar oluşur. Kristal biçimde olan killer ve şeyllerin puzolanik aktivite gösterebilmeleri için düzensiz yapıya getirilmeleri gerekmektedir. Bunun için 540°C-900°C'de ısıtılma sokulmaları gerekmektedir (Ün, 2007).



Diatomitler, tek hücreli alglerin taşlaşması neticesinde oluşurlar ve bünyelerinde yoğun şekilde silis minerali barındırırlar. Diatomitlerin, amorf yapılarına ve ihtiva ettikleri silis minerali ile kil oranına göre puzolanik aktivitesi değişmektedir. Yapısında yüksek miktarda kil içeren diatomitlerin puzolanik aktivitesi azdır. Diatomitlerin puzolanik aktivitelerini yükseltmek için 760°C-1000°C’de ısıtılma işlemi gerekmektedir (Ün, 2007). Puzolanik aktivite beklentisi olmayan uygulamalarda diatomit kayalarda ısıtılma işlemi gerekmemektedir.

### 2.2.2 Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, endüstriyel ürünler ortaya çıkarken yan ürün olarak meydana gelen ve inceltirilerek özgül yüzelerinin artırılmasıyla puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Uçucu kül, granule yüksek fırın cürufu ve silis dumanı günümüzde en fazla kullanılan yapay puzolanlardır. Pirinç kabuğu külü ise özellikle Asya ülkelerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Portland çimentosu ve yapay puzolanların özgül yüzey alanları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1** Portland Çimentosu ve Yapay Puzolanların Özgül Yüzey Alanları (Şimşek, 2012)

Malzemeler	Özgül Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /kg)
Silis dumanı	20000
Çeltik kabuğu külü	50000-60000
Uçucu kül	400-700
Portland çimentosu	300-400
Yüksek fırın cürufu	350-650

**Uçucu Kül:** Isınma amacıyla kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek için öğütülmüş şekilde yakılması sonucu ortaya çıkan yan üründür. Uçucu kül, termik santral bacalarına yerleştirilen elektro süzgeçlerin parçacık ebatları 1-150 µ arasındaki külleri yakalamasıyla elde edilir. Düzensiz yapıda olan uçucu küller, bünyelerinde önemli miktarda silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve kalsiyum oksit (CaO) barındırırlar. Termik santrallerde kömürün yanma koşulları, bileşimi, sentez aletinin cinsi ve verimliliği uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik niteliklerinin farklılık göstermesine neden olmaktadır. (Erdoğan, 1991)

Toz halindeki kömür küllerinin bileşimleri ile ilgili araştırmalar 20. yy.ın başlarında ortaya çıkmıştır. Bu küllerin bileşimleri ile doğal puzolanların bileşimleri arasında paralelliğe rastlanması sonucu, toz haldeki kömür küllerinin puzolanik özellikleri incelenmeye başlanmıştır. Fakat, çalışmaların başlarında uçucu kül katkılı beton üretiminde başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Daha sonraki çalışmalarda toz haldeki kömür küllerinin yeterli miktarda puzolanik özellik belirtmeleri için kömürün yanma ısısının fazla olması ve küllerin çabuk soğutulması gerektiği fark edilmiştir. İstenilen özellikteki uçucu küller ancak 1930'lu yılların başlarında ABD'de Cleveand Electric Illuminating Company ve Detroit Edison Company gibi elektrik üretimi yapan işletmeler vasıtasıyla yan ürün olarak elde edilen küller olmuştur. Bu yüzden uçucu küllerin beton üretimde mineral katkı olarak ikame edilmesine dair ilk çalışmalar 1932 yılında başlamıştır (Price, 1975).

Uçucu küller hidrasyon ısısını düşürerek çatlak oluşumunu azalttığından özellikle kütle beton üretiminde yararlanılmaktadır. 1948 yılında ABD'nin Montana eyaletinde inşasına başlanan Hungry Horse Barajı uçucu kül katkılı betondan yapılan ilk büyük projedir. Bu projede Portland imentosu ağırlıkça %32,4 oranında uçucu küle yer değiştirilmiştir (Davis ve ark., 1937).

**Silis Dumanı:** Silis metalinin ya da ferrosilisyum olarak isimlendirilen karışımların üretiminde meydana gelen yüksek oranda saflığa sahip kuvarsın çok ufak parçalara indirgenmesi sonucu oluşan çok ince tanecik biçimine sahip bir tozdur. Atık ürün olarak ark fırınlarının bacalarında filtreler kullanılarak toplanılan silis dumanı “baca tozu” olarak da adlandırılmaktadır. (Keçeci, 2018).

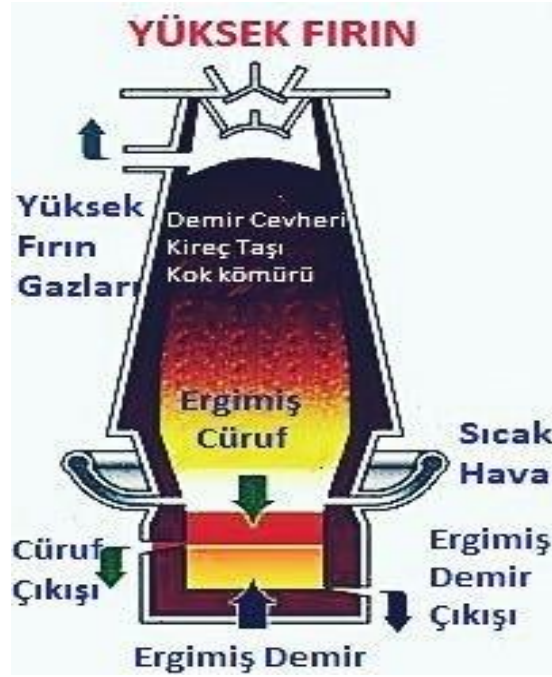
Silis dumanı bünyesinde yüksek oranda (%85-98) silika içermesi, düzensiz yapıda olması ve Portland imentosunun özgül yüzey alanının yaklaşık yüz katı oranda daha fazla özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle puzolanik aktivitesi çok yüksek bir yapay puzolandır. Bu nedenle çok yüksek dayanıma sahip beton üretimi sağlamaktadır.

Silis dumanının betonda imento ile yer değiştirme malzemesi olarak yararlanılmasına ilişkin ilk çalışmalar 1950 yılında Norveç Teknoloji Enstitüsünde incelenmiştir. Bu araştırmada elde edilen olumlu neticeler ışığında Oslo'da bulunan

Blindtarmen Tüneli'nin inşasında kullanılmıştır. Bu tünelin yapımında %15 oranında silis dumanı ilave edilmiştir (Mehta, 1986).

**Yüksek Fırın Cürufu:** Demir-çelik fabrikalarında bulunan yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında ortaya çıkan ve hafif olması dolayısıyla işlenmemiş demirin üzerinde meydana gelen bir yan üründür.

1774 yılında Lariot adlı bilim insanı tarafından yapılan araştırmalar yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özellikte malzeme olduğunu ortaya çıkarmıştır. Emil Langen adlı bilim insanının 1862 yılında yaptığı araştırmalar ise öğütülmüş yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcı özelliğinin farkedilmesini sağlamıştır. 1892 yılında ise ilk defa Portland çimentosunun yüksek fırın cürufu ile yer değiştirildiği çimento üretilmiştir.



Şekil 2.2 Yüksek Fırın Cürufu Oluşumu

Yüksek fırın cürufu, ağır soğutulduğunda kristal bir biçimde olmaktadır. Bu biçimde bazaltla benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma ise camsı biçimde katı eriyik oluşmasına neden olmaktadır. Bu yarı kararlı camsı malzeme, çok ince yapıda olacak şekilde öğütülerek ve Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile birleşerek hidrolik özellik kazanmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 1997).

**Pirinç Kabuğu Külü:** Zirai ürün artığı olan pirinç kabuğu külü bünyesinde yüksek miktarda (%81-95) silis ve %8-11 oranında kül barındırmaktadır. Kabuğun ve sapın esas yapısını selüloz ve lignin oluşturmaktadır. Kabuk ve sapın yakılmadan önce 1-5 mm boyutlarında inceltmesi gerekmektedir. Pirinç kabuğunun, yaklaşık 575±25°C elektik kül fırınlarında yakılması ile pirinç kabuğu külü oluşur. Meydana gelen küller, bilyeli öğütme değirmenlerinde inceltilerek puzolanik aktivitesi artırılır. Külün içinde barındırdığı silis oranı yakma sıcaklığına, yakma süresi ve yakma hızına bağlı olarak değişiklik gösterdiği gibi pirincin büyüme ortamına ve iklim şartlarına bağlı olarak da değişmektedir. Kül, çok ince yapıda olması nedeniyle çimento hamuru ve agrega üzerinde bulunan kılcal boşlukları kapatır böylece gözeneklerin daralmasını ve kılcal açıklıkların kesintiye uğramasını sağlar. Bu sebeple betonlarda kül katkısı kullanılması fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmektedir (Şimsek, 2012).

### **2.3 Puzolanik Aktivite**

Harç ve betonların üretiminde kullanılan portland çimentosu ile ikame katkı malzemesi olarak eklenen puzolanların birlikte kullanıldığı karışımlara su ilave edildiğinde ilk olarak portland çimentosu hidratasyona başlamaktadır. Bu durum portland çimentosunda bulunan kalsiyum silikatlı bileşenlerin hidratasyonu ile kalsiyum hidroksiti ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ve çimentoya bağlayıcı özelliğinin kazanmasını sağlayan kalsiyum-silika-hidrat ürünlerinin meydana gelmesine neden olmaktadır. Yapısında yüksek miktarda silis ve alümin içeren ince taneli puzolanik katkı malzemeleri ise bu hidratasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcı özellikte yeni kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasını sağlamaktadır. Puzolanik aktivite ise meydana gelen bu kimyasal reaksiyonlarda puzolanların reaksiyon sonucunda kazandıkları bağlayıcılık ve dayanım özelliğinin bir ölçütüdür. Literatür çalışmaları incelediğinde puzolanların yüksek puzolanik aktiviteye sahip olması için bünyelerinde yüksek oranda  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içermeleri, düzensiz yapıda olmaları ve özgül yüzey alanlarının fazla olması gerektiği anlaşılmaktadır.

TS 25 standartlarına göre, puzolanik aktivite deneyleri sonucunda üretilen harç karışımların 7 günlük basınç dayanımlarının en az 4 MPa değerini sağlaması gerekmektedir. Ayrıca, yine TS 25'e göre doğal puzolanların sağlaması gereken kimyasal özellikler de Çizelge 2.2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.2** Doğal Puzolanların Sahip Olması Gereken Kimyasal Özellikler

<b>Kimyasal Özellik</b>	<b>Miktar</b>	<b>Kütlece %</b>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Minimum	70.0
SO <sub>3</sub>	Maksimum	3.0
Reaktif silis	Minimum	25.0
Klorür	Maksimum	0.1

Puzolanik aktivitenin ölçümünde puzolan türlerinin hepsi için uygulanabilir yerleşik bir ölçüm şekli bulunmakta olup bu sebeple fiziksel, kimyasal ve mekanik ölçüm gibi çeşitli ölçüm yöntemlerinden faydaniılmaktadır.

Kimyasal ölçüm yönteminde, puzolanların kireç karışıma ilave edildiğinde belirli bir süre neticesinde ortamda bulunan kalsiyum iyonlarının değerine bakılmakta böylelikle puzolanların kalsiyum hidroksit bağlayabilme yetisi ve çabukluğu ölçülmektedir.

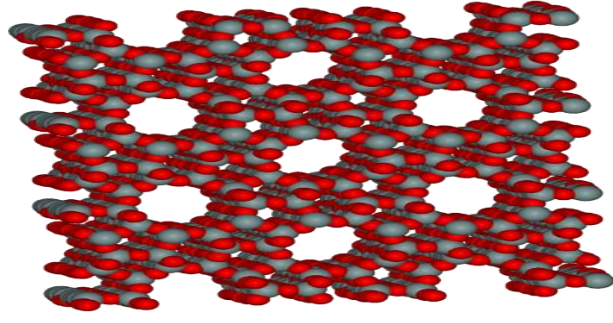
XRD ölçüm yöntemiyle ise kireç-puzolan karışımlarında bağlanmış Ca(OH)<sub>2</sub> değeri saptanabilmektedir. Böylelikle yapılan ölçümlere göre gerçekleştirilen bir araştırmada altı aylık ve bir yıllık numunelerde bağlanmış Ca(OH)<sub>2</sub> ve mukavemet arasında yüksek bir ilişki saptanmıştır (Swamy, 1986; Mortureux ve ark., 1980).

Portland çimentosu ve puzolan karışımlarında bağlanılan kireç değeri çoğaldıkça mukavemet yükselmektedir fakat sadece bu husus dikkate alınarak mukavemet değerini doğru bir şekilde kestirmek mümkün olamamaktadır.

#### **2.4 Doğal Puzolan Zeolitlerin Isıl Performansları**

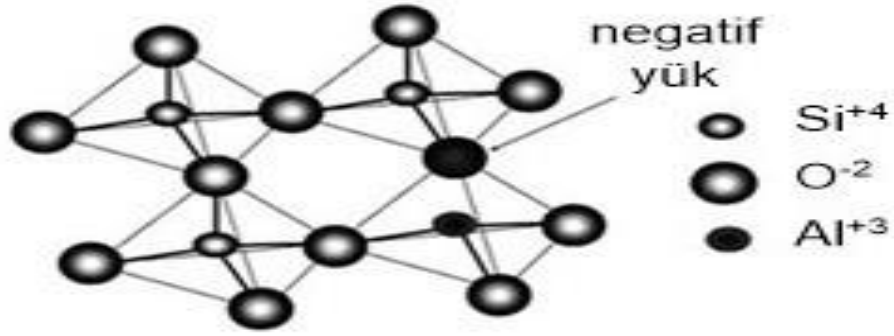
Volkanik patlamalarla yeryüzüne dağılan lavların ve küllerin göl veya deniz sularıyla birleşerek kimyasal tepkimelere girmesi sonucu meydana gelen kristal yapılı, bünyesinde alkali ve toprak alkali katyonları barındıran alumina silikatlara zeolit denir (Kumbasar, 1977).

Zeolit, 1756 yılında İsveç’li mineralog Cronstedt tarafından bulunmuştur ve Cronstedt doğal zeolitleri türlerine göre sınıflandırmıştır. Keşfettiği zeolit, ısıtıldığı zaman hızlı bir şekilde su kaybeden yapıda olması nedeniyle Latince “zeo” ve kaya parçalarının ısıtılmasına da “lithos” denilmesi yüzünden malzemeye zeolit ismini vermiştir (Breck, 1974; Karaüç, 2008).



Şekil 2.3 Zeolit Molekülünün Yapısı (Şahin, 2014)

Zeolitlerin kafes biçimindeki kristal yapıları, köşe paylaşımli oksijen atomları ile birbirine entegre olmuş sonsuz uzunluktaki tetrahedral  $Al_2O_3$  ve  $SiO_4$  bileşiklerinden oluşmaktadır. Zeolit çatısındaki tüm  $AlO_4$  bileşiği net bir negatif yük bulundurmakta ve bu yük zeolit çatısı dışındaki katyonlarla dengelenmektedir (Konuk, 2013).



Şekil 2.4 Zeolit Yapısının Ana Yapıtışı Düzgün Dörtüzlü (Beşergil, 2018)

Zeolitlerin yapısında bulunan boşlular, moleküler elek fonksiyonu sağlamaktadır. Negatif yüklü zeolitler yüksek iyon değiştirme kabiliyeti ve boşluklu yapısı sebebiyle yüksek adsorbsiyon ve soğurma özelliğine sahiptir. Bu nedenle zeolitler günümüzde atık suların temizlenmesi,  $CO_2$  ve  $SO_3$  gibi gazların süzülmesi, radyoaktif atıkların bertaraf edilmesi, petrol akıntılarının temizlenmesi, güneş enerjisinden faydalanma, zirai mücadele, besicilik, madencilik, sağlık ve inşaat gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

Zeolitler, yüksek ısı absorbe etmesinin yanında yapısal istikrarını değiştirmeden hidrasyon ve dehidrasyon özelliği nedeniyle birçok ısı depolama sistemleri ile güneş enerjisine dayalı soğutma sistemlerinde kullanılmaktadır (Dincer ve Rosen, 2002).

Zeolitlerin, suyun tersinir buharlaşma özelliğinden yararlanılarak binaların nem muhtevasının iyileştirilmesinde kullanılır. Havayla birlikte su buharı ve ısı zeolitlerin termal kütle yatağına iletilir. Desorpsiyon modunda sıcak hava akımı dolgulu yatağı girer ve suyu adsorbentten desorbe ederek yatak soğutucusundan çıkar böylece doymuş hale gelir. Adsorpsiyon modunda önceden nemlendirilmiş, serin hava desorbe olmuş paketlenmiş yatağı girer. Adsorban su buharını adsorbe eder ve adsorpsiyon ısını serbest bırakır. Sıcak ve kuru halde çıkan hava binaların ısıtılması için kullanılabilir (Hauer, 2002).

## 2.5 Termal (Isıl) Performansı Etkileyen Parametreler

Binaların ısıtma ve soğutma özelliğinin en büyük parçasını meydana getiren duvar ve tavanların termal verimliliğinin yükseltilmesi, bu elemanların yeterli faz kayması ve sönüm miktarı ile direkt alakalı olup bu değişkenler yüksek oranda yapı malzemesinin bizzatı termofiziksel özellikleri olan yoğunluk, ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı yayılım katsayısı değerlerine bağlıdır (Moosavi ve ark., 2014). Bu özellikler ise bu yapıyı meydana getiren malzemelerin mikro yapılarına, kayaç özelliklerine, üretiminde içerdiği malzemeler ile bunların kullanım oranlarına, nem muhtevasına ve boşluk yapısına bağlıdır (Khan, 2002). Enerjiden etkin ve verimli bir şekilde faydalanabilmesi için binaların inşasında doğru termofiziksel niteliklere haiz malzemeler seçilmeli ve binaların ısınması ve soğutulmasında kullanılan sistemlerin iyi bir şekilde hesaplanması icap etmektedir (Yıldırım ve ark., 2018).

### 2.5.1 Özgül Ağırlık

Malzemelerin boşluklu yapılarını da kapsayan birim hacminin ağırlığına özgül ağırlık denir. Özgül ağırlık değeri düşük malzemelerin porozitesi yüksektir. Özgül ağırlık;

$\rho$  : Özgül ağırlığını,

$W$  : Toplam ağırlığı,

$V$  : Toplam hacmi göstermek üzere,

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (2.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

### 2.5.2 Özgül Isı

Bir maddenin birim kütesinin sıcaklığında birim değişime neden olan ısı miktarına özgül ısı denir. Özgül ısı;

- $c_p$  : Özgül ısıyı,  
 $Q$  : Verilen toplam ısıyı,  
 $m$  : Kütle,  $\Delta T$  : Sıcaklık farkını göstermek üzere,

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

### 2.5.3 Isı Kapasitesi

Bir maddenin sıcaklığını 1°C değiştirmek için gerekli olan ısı miktarıdır. Maddenin özgül ısı sabit iken ısı kapasitesi kütlesi ile doğrudan orantılıdır. Isı kapasitesi;

- $C$  : Isı kapasitesini,  
 $c_p$  : Özgül ısıyı,  
 $m$  : Kütle göstermek üzere,

$$C = c_p \cdot m \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

### 2.5.4 Isıl İletkenlik Katsayısı

Isının, katı malzeme veya sıvı akışkan içerisinde sıcaktan soğuya doğru ilerlemesine ısı iletimi denilmektedir. Isı iletimi, ısıl denge sağlanana kadar yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru olmaktadır. Isı iletkenlik katsayısı ise malzemenin birim kalınlığı boyunca birim alandan birim sıcaklıkta ısı aktarım hızıdır. Katı maddeler üzerinde iletim yolu ile gerçekleşen ısı aktarımı Fourier ısı iletim yasası göre hesaplanmaktadır. Buna göre, ısıl iletkenlik katsayısı düşük malzemelerin yalıtım özellikleri yüksektir (Yılmaz, 2018).

Malzemelerin ısıl iletkenlik katsayısı, molekül ve gözenek yapısı ile gözeneklilik oranına bağlıdır. Ayrıca malzemenin gözenek duvarı kalınlığı da önemli bir etken olduğu gibi malzemenin gözenek yarıçapı küçüldükçe ısı iletkenliği de azalmaktadır. Isı iletkenlik katsayısı;



$k$  : Isıl iletkenlik katsayısını,  
 $q$  : A kesitinden geçen ısı akısını,  
 $\Delta L$  : Kalınlık farkını,  
 $\Delta T$  : Sıcaklık farkını göstermek üzere,  

$$k = q \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (2.4)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

### 2.5.5 Isıl Yayınım Katsayısı

Isıl yayınım katsayısı, ısının malzeme içerisinde ne kadar hızlı bir şekilde yayıldığını belirten bir katsayıdır. Isıl yayınımı yüksek olan malzemelerde, ısı depolanması az iken ısı iletimi fazladır. Isıl yayınım katsayısı;

$\alpha$  : Isıl yayınım katsayısını,  
 $k$  : Isıl iletkenlik katsayısını,  
 $\rho$  : Özgül ağırlığı,  
 $c_p$  : Özgül ısıyı göstermek üzere,  

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2.5)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

### 2.6 Köpük Harç ve Betonlar

Köpük harç ve betonlar bünyesine çimento, ince agrega ve su bulundurmasının yanı sıra köpük ajanı da ilave edilmesiyle oluşturulan boşluklu ve homojen yapıda hafif malzemelerdir. İlk olarak 1923 yılında Axel Ericksson tarafından Portland çimentosuyla köpük beton üretilmiş ve zamanla köpük beton teknolojisi ilerlemiştir (Beningfield ve ark., 2005; Jones ve McCarthy, 2005a).

Üretilen köpük betonun nitelikleri; üretiminde kullanılan köpük ajanının özellikleri ve miktarı, köpük hazırlama şekli, hava boşluğu dağılımının homojenliği, karışım şekli ve eklenen agregaların boyut dağılımı gibi birçok faktörle ilişkilidir. Bu nedenle, klasik bir köpük beton karışımı hazırlama yöntemi bulunmamaktadır (Ramamurty ve ark., 2009).

Yapı elemanlarında kullanılan köpük betonun birim ağırlığının düşük olması yapıdaki mevcut ölü yük ağırlığını azaltmaktadır. Böylece yapının olası bir depremde

karşılacağı deprem yüklerini azaltarak taşıyıcı kesitlerin küçülmesine dolayısıyla ekonomik ve faydalı bir tasarıma neden olmaktadır.

Özgül ağırlığı düşük köpük beton, yüksek yalıtım özelliklerine ve düşük dayanım değerlerine sahipken, özgül ağırlığı yüksek köpük beton, daha düşük yalıtım özelliklerine ve yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Köpük beton, üretiminde kullanılan malzemelerin özgül ağırlığına ve yapısına bağlı olarak normal özgül ağırlıktaki betondan %10-50 daha düşük bir ısı iletkenlik katsayısına sahiptir (Ramamurthy ve ark., 2009).

Köpük betonlar yüksek ölçüde dayanım/ağırlık oranı, işlenebilme, ısı ve ses yalıtımı, donma-çözünme ve yangın dayanımı ile düşük miktarda su geçirimsizliği, rötre ve ısı geçirgenlik katsayısına sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir. Günümüzde köpük betonlar:

- Isı izolasyon amaçlı hafif tuğla, briket, blok tuğla, duvar panel üretiminde,
- Isı ve ses izolasyonlu şap üretiminde,
- Prefabrik yapılarda,
- Yapı çevresindeki göçmeleri engellemek amaçlı hafif dolgu beton üretiminde,
- Yapılarda bodrum katların ısı izolasyonu için toprak altı dolgu betonlarında,
- Toprak altında su drenajının sağlanması için boşluklu dolgu beton üretiminde,
- Köprülerde buzlanmayı önlemek amacıyla yol altı dolgu betonlarında,
- Uçak pistlerinin saha altı dolgu betonlarında kullanılmaktadır (Çizelge 2.3).

**Çizelge 2.3 Köpük Betonun Özgül Ağırlığına Göre Uygulanma Şekilleri**

<b>Özgül Ağırlık (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Kullanım Şekli</b>
300-600	Isı ve ses izolasyonu (tavan ve yer döşeme)
600-900	Blok ve panel üretimi
900-1200	Dış ve ara duvar, blok ve panel
1200-1600	Taşıyıcı nitelikte duvar, blok ve panel

### 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çaçur (2019), hücresele hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi konusunda yaptığı çalışmalarda, en yüksek yalıtım özelliklerine sahip hücresele hafif beton numuneler elde edebilmek için numunelerin birim ağırlığını en düşük seviyelere indirerek birçok deneysel çalışmalar yapmıştır. Elde ettiği numunelerden en düşük kuru özgül ağırlığı ( $139 \text{ kg/m}^3$ ) olan numunenin aynı zamanda en düşük ısı iletkenliğe ( $0,0398 \text{ W/mK}$ ) sahip olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca özgül ağırlığı düşük numunelerin ultrasonik ses deneylerinde hız iletimlerinin de düşük olduğunu saptamıştır. Buna ilaveten numunelerin su emme oranlarının çok yüksek olduğunu hatta bazılarında %200'e varan su emme oranları olduğunu gözlemlemiştir. Deneysel çalışmalarda su emme oranı düşük numunelerin aynı zamanda donma-çözünme testlerinde başarılı olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Gökçe (2019), çimento esaslı köpük sıvanın üretilebilirliği ve karakterizasyonu üzerine yaptığı çalışmalarda, köpük sıva bileşimlerinde bağlayıcı olarak Portland çimentosu ve kireç, hafif agrega olarak genişletilmiş perlit, kaplı perlit, cam küre ve diyatomit kullanmıştır. Sentetik köpük ajanı ile ürettiği köpüğün özgül ağırlığı  $85 \text{ g/l}$  olarak ölçülmüştür. Tüm karışımlarda su/çimento oranını  $0,5$  almıştır. Yapılan deneyler sonucu numunelerin özgül ağırlıklarını  $250 \text{ kg/m}^3$  ve ısı iletkenliklerini  $0,065 \text{ W/mK}$  olarak tespit etmiştir. Bu sonuçlara dayanarak ürettiği köpük sıva numunelerinin birim maliyetinin geleneksel ısı yalıtım malzemelerine göre  $1.5-3.5$  kat daha düşük olduğu sonucuna varmıştır. Böylece alternatif ısı yalıtım malzemesi olabileceğini ortaya koymuştur.

Yılmaz (2018), analsim ve klinoptilolit ikamesi ile üretilmiş çimento ve harç ve betonun ısı depolamada kullanımı üzerine yaptığı deneysel çalışmalarda doğal zeolitlerin çimento ile farklı ikame oranlarında (%0, %10, %30 ve %50) kullanılmasıyla elde edilen numunelerin kontrol grubuna göre özgül ağırlıklarını, puzolanik aktivitelerini, su emme oranlarını, ultrases geçiş hızlarını, ısı iletkenliklerini incelemiştir. Buna göre, doğal zeolitlerin betonun özgül ağırlığını düşürdüğünü, inceliğinden dolayı puzolanik aktiviteyi arttırdığını, su emme oranını arttırdığını, ultrases geçiş hızını azalttığını gözlemlemiştir. Ayrıca zeolit miktarı arttıkça numunelerde ısı iletkenlik, özgül ısı, ısı kapasitesi ve ısı yayılım değerleri

azalmıştır. Buna ilaveten klinoptilolit katkıli çimentonun kazanımlarının analsim ile de sağlanabileceğini gözlemlemiştir.

Karakurt ve ark., (2010) yaptıkları deneysel çalışmalarda doğal zeolit olarak klinoptiloliti gaz beton üretiminde bağlayıcı ve agrega olarak kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre doğal zeolit ikame numunelerde ısı iletkenliğin düşük olduğunu saptamışlardır. Böylece doğal zeolitler ile üretilen gaz betonların yapı duvarlarında kullanılabilirliğini ve bina yalıtımında önemli bir kazanım sağlayacağı sonucuna varmışlardır.

Demirboğa ve Gül (2003), yaptıkları deneysel çalışmalarda perlit ve pomza agregasından oluşan beton karışımların termal iletkenlik katsayılarını ölçmüşlerdir. Silis dumanı ve uçucu külün hafif beton üzerindeki etkilerini ölçmek için karışımda bulunan çimento ile %10, %20, %30 azalan oranda ikame etmişlerdir. Numuneler üzerinde en yüksek termal iletkenlik olan 0,3178 W/mK değerini pomza agregalı ve katkısız beton numunelerde elde etmişlerdir. Karışıma uçucu kül ve silis dumanının artan oranlarda eklenmesi sonucu bu oranın azaldığını gözlemlemiştir. Numuneler üzerinde en düşük termal iletkenlik katsayısı olan 0,1472 W/mK değerini ise pomza agregasının yerine ikame edilen genişletilmiş perlit agregası ve %70 oranında çimento ile %30 oranında uçucu kül birleşiminden elde edilen karışımlarda gözlemlemiştir. Uçucu kül ve silis dumanının termal iletkenlik üzerinde azaltıcı etkisini saptamışlardır. Ayrıca genişletilmiş perlitin (pomza taşı yerine kullanılan) %43,5 oranında termal iletkenliği azalttığı sonucuna varmışlardır.

Zhao ve ark., (2015) yaptıkları çalışmalarda 1300 kg/m<sup>3</sup> özgül ağırlığında köpük beton harçları üretmişlerdir. Taze betonun yüksek basınç dayanımını anlamak için su/çimento oranı 0,54-0,64 arasında değişen laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Optimum su/çimento değeri 0,56 olan iki farklı köpüklü çimento harcı hazırlamışlardır. Bunlar çimento-köpük harcı ve cürufli-köpük (%50 çimento ile yer değiştirilmiş cüruf) harçları olmuştur. Dört farklı kür koşullarında numunelerin basınç, ultrasonik ses ve termal iletkenlik performanslarını incelemiştir. Test sonuçlarında %50 ikameli cüruf kullanılmasının basınç dayanımını, UPV ve termal izolasyonu geliştirdiğini gözlemlemiştir. Ayrıca ilk 7 günlük su küründe bekletilen numunelerin hava kürü ve doğal kür koşullarındaki numunelere göre daha yüksek

basınç ve artan UPV değerlerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak bu olumlu etkilerin UPV ve termal iletkenlikten ziyade basınç dayanımı durumunda daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Davraz ve ark., (2015) ü yaptıkları çalışmalarda, bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu, kalker tozu, polipropilen elyaf ve super akışkanlaştırıcı kullanarak yaptıkları harçlara, 80 g/l yoğunluğunda köpük ekleyerek 12 farklı kuru yoğunlukta beton numuneler üretmişlerdir. Karışımlarda 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı, sabit 0,30 oranında su/katı ve kum/çimento oranı olarak ise 0-3,66 oranında değiştirerek üretimler yapmışlar ve ısı iletkenlik özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen tüm deney serileri için 6 adet 150 mm küp ve 3 adet 300x300x50 mm plaka numuneler oluşturulmuş ve test aşamasına kadar 20±2°C sıcaklık ve %95 bağıl nem içeren ortamda kürlenmişlerdir. Isıl iletkenlik ölçümünde kullanılacak numuneler ise 110 °C sıcaklıkta etüvde kütlesi değişmeyecek duruma gelecek kadar kurutulmuştur. Isıl iletkenlik deneyleri Laser Comb Fox 314 cihazı ile yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre köpük betonda hacim sabitliğinin birçok faktöre bağlı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Bu faktörlerden bazıları karışıma giren bileşimlerin miktarı ve türü, ortam koşulları, köpük yoğunluğu, köpüğün karıştırma devri ve süresidir. Ayrıca kuru yoğunluğu 300-1400 kg/m<sup>3</sup> numuneler hedeflenirken kuru yoğunluğu 333-1608 kg/m<sup>3</sup> arasında numuneler üretilmiştir. Bu duruma kum/çimento oranına bağlı olarak köpük kararlılığının değişmesi ve köpük yoğunluğunun 70-95 g/l arasında değişiminin neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ilaveten köpük betonun kuru yoğunluğu ile basınç dayanımının orantılı olduğuna ve doğrusal fonksiyonla yaklaşık olarak tahmin etmenin mümkün olduğuna karar getirmişlerdir. Ayrıca numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının sabit 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı, kalker tozu ve sabit 0,30 su/katı oranındaki karışımlarda kuru yoğunluk değeri ile doğrusal olarak arttığı ve fonksiyonel denklemlerle bu katsayıların tahmin edilmesinin mümkün olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Tuzlak (2017), yaptığı çalışmada, köpük beton karışımlarında su/çimento oranını, çimento dozajı ve köpük miktarını değiştirerek taze betonun dayanım ve ısı iletkenlik değerlerini gözlemlemiştir. Buna göre; en yüksek basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluğu en yüksek numunede olurken en düşük basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısı ise yoğunluğu en düşük numunede görülmüştür.

Zhihua ve ark., (2014) laboratuvar ortamında deneysel malzemeleri karıştırarak ve köpürterek yoğunluğu  $150 \text{ kg/m}^3$  ile  $300 \text{ kg/m}^3$  arasında değişen süper düşük yoğunluklu köpük beton numuneler üretmişlerdir. Ana bağlayıcı malzeme olarak sülfoalüminat çimentosu gibi hızlı sertleşen özel çimento yerine geleneksel Portland çimentosunu kullanmışlardır. Köpük betonun kararlı bir yapıda olması için kimyasal ve fiziksel katkıları uygun bir şekilde eklemişler ve oranların kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Elde ettikleri beton numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının  $0,33-1,1 \text{ MPa}$  arasında, su emmelerinin  $\%6,6-8,3$  arasında ve termal iletkenliklerinin  $0,05-0,07 \text{ W/mK}$  arasında olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, köpük betonların dayanım özelliklerinin ultra ince yüksek fırın cürufu ve akışkanlaştırıcı katkı kullanarak arttırılabileceğini ve çatlaklarının da polipropilen lifler kullanılarak iyileştirilebileceği sonucuna varmışlardır.

Kılınçarslan ve ark., (2019) genişletilmiş polistren atıklarının uçucu kül içeren köpük beton üzerine etkilerine ve kullanılabilirliğine ilişkin deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmalarında su/bağlayıcı oranı olarak sabit  $0,45$  değeri kullanılmışlardır. Bağlayıcı Portland çimentosu, su ve uçucu kül miktarı sabit tutulurken, azaltılan köpüğe eşdeğer hacimde ( $200$  ve  $400 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ) genişletilmiş polistren kullanımını arttırmışlardır. Böylece yapılan değişimlerin numunelerin ısı iletkenlik, basınç dayanımı ve büzülmesine etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda genişletilmiş polistren (EPS) kullanımının numuneler üzerinde basınç dayanımı ve yoğunluk artışı nedeniyle ısı iletkenliği arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca EPS kullanım miktarına göre büzülme ve genleşme oranlarının birbirleriyle uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Ören (2017), karışımlarda granüle yüksek fırın cürufunu (GYFC) kum ile  $\%50$  ve  $\%100$  oranında yer değiştirerek ve çimento dozajını  $300$ ,  $400$  ve  $500 \text{ kg/m}^3$  kullanarak köpük beton numuneleri üzerinde fiziksel, mekanik ve ısı testleri yapmıştır. Testler sonucunda dayanım için çimento miktarını arttırmanın çok fazla önemi olmadığını, dayanımı etkileyen asıl faktörün porozite olduğunu gözlemlemiştir. Köpük betonlarda GYFC'nun herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kum yerine kullanılabilirliğini belirtmiştir. GYFC'nun çimentodan özgül ağırlığının düşük olması nedeniyle numunelerin birim hacim ağırlığını azalttığı sonucuna varmıştır. Deneyler sonucunda GYFC'nun ultrases geçiş süresini azalttığını belirtmiştir.

Ayrıca, GYFC'nin kum ile benzer özellikler göstermesi nedeniyle ısı iletkenlik katsayısına etkisinin çok fazla olmadığını belirtmiştir. Çimento dozajının artması poroziteyi azalttığından numunelerin ısı iletkenliğini arttırdığı sonucuna varmıştır.

Hilal ve ark., (2015) farklı katkı maddelerinin hava boşluğu büyüklüğü ile karakterize beton stabilitesine etkisi ve bu parametrelerin tanımlanması ve mukavemete bağlı olarak çimento hamurunun mikro yapısındaki değişiklikleri araştırmışlardır. Önceden oluşturulmuş 9 farklı köpük karışımının farklı yoğunluktaki (1300, 1600, 1900 kg/m<sup>3</sup>) hallerinin birlikte ve ayrı ayrı kullanılan katkısız ve katkılı (silis dumanı, uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı) maddelerle etkisini incelemişlerdir. Deneylerde optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunu kullanmışlardır. Geleneksel karışımlarla kıyaslandığında, katkı maddesi kullanımı (ayrı ayrı ve birlikte) hem çimento harcı mikroyapısında hem de hava boşluklu köpük beton yapısında gelişime yardımcı olduğunu gözlemlemişlerdir. Belirli bir yoğunluk için karışımlarda katkı maddesi kullanımı boşluk yapısını arttırmıştır fakat boşlukların ve bağlantıların azalmasını sağlamış, birleşmelerini önleyerek küçük boşluk yapılarına neden olmuştur. Bu durumda köpük beton mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca boşluklar üzerinde en fazla etki süperakışkanlaştırıcının tek başına kullanıldığı durumda gözlemlenmiştir. Buna ilaveten diğer katkı maddeleri (uçucu kül ve silis dumanı) ile kullanıldığında ise köpük betonun boşluk yapısını ve mikro dayanımını birlikte iyileştirdiklerini tespit etmişlerdir.

Jitchaiyaphum ve ark., (2011) Portland çimentosunu köpük ajanı ve puzolanlarla karıştırılmasıyla elde edilen hücreli hafif betonun su emme, basınç dayanımı ve porozitesini incelemişlerdir. Bağlayıcı olarak uçucu külü Portland çimentosu ile %10, 20 ve 30 oranında ikame etmişlerdir. Su/bağlayıcı oranı sabit 0,5 alınmış ve birim ağırlığı 800 kg/m<sup>3</sup> numunelerin 3, 14, 28 ve 60 günlük basınç dayanımını kıyaslamışlardır. Çalışmada çimento yerine uçucu kül kullanımı erken dönemde yüksek dayanım sağlamıştır. Deneysel sonuçlara bakıldığında uçucu kül kullanımı köpük betonun dayanımını arttırmıştır. Yüksek uçucu külün çimento ile ikame edilmesi erken dönemde basınç dayanımını etkilememiştir. Fakat yüksek uçucu külün çimento ile ikame edilerek kullanımı gözenek boyutunun küçülmesine böylece basınç dayanımının artmasını sağlamıştır.

Khalaf ve ark., (2018) jeopolimerik hafif beton üretmek için köpüklü uçucu kül jeopolimeri sentezlemişlerdir. Hafif beton üretiminde agrega ve kabarcık oluşturuıcı faktör olarak yerel zeolit kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında 42,5 tip Portland çimento, su, ince ve/veya kalın zeolit ve süperakışkanlaştırıcı kullanarak 4 çeşit beton karışı yapmışlardır. Zeolitler 5 mm'den büyük (Zk) ve 5mm' den küçük (Zi) olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmalarında Mısır' da yerel bir bölgedeki zeolitin puzzolanik aktivitesini incelemeyi hedeflemişlerdir. Önceki çalışmalarda sadece ince zeolit agrega ve kabarcık oluşturuıcı olarak kullanılmış iken bu çalışmada ince ve kalın zeolit aynı amaçla kullanılmıştır. Ayrıca zeolitlerin uzun kür şartlarında puzzolanik etkisi ortaya çıkmıştır. Kalın zeolit kullanımı hafif betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmiştir. İnce ve kaba zeolite kullanımında optimum oranın %50-%50 olduğu belirlenmiştir ve bu durumda basınç dayanımı, birim ağırlık ve eğilme dayanımlarını sırasıyla 28 MPa, 1830 kg/m<sup>3</sup> ve 4.7 MPa olarak bulmuşlardır.

Kuzielova ve ark., (2016) önceden oluşturulmuş köpük ile farklı hacimlerde sıvı köpük ve sabit su/çimento oranı 0,55 kullanarak köpük beton oluşturmuşlardır. Köpük jeneratörü ile üretilen sıvı köpükler protein bazlı köpük ajanı, su ve hava içermiştir. Köpük ajanının yoğunluğunun etkisi ve onun mikrodalga ve ultrasonik davranışının; köpük stabilitesi, kütle yoğunluğu, mikro yapısı ve sonuçta ortaya çıkan basınç dayanımı ile incelemişlerdir. Daha düşük mikrodalga ve ultrasonik işlem görmüş köpük ajanı konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde gözenek boyutunun küçüldüğünü ve basınç dayanımının iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Numunelerin SEM görüntüsü ile ortalama gözenek boyutunu tespit etmişlerdir. XRD analizi ile mineral yapısını çözümlemişler ve TG-DTA simülasyonu kullanarak termal stabilite üzerinde çalışmışlardır. Ayrıca köpük ajanının düşük konsantrasyonda kullanılmasının etkisi çok belirgin olmasa da köpük stabilitesinde pozitif etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak köpük ajanının düşük konsantrasyonda kullanılması hidrasyon reaksiyonunun geciktirici etkisini bastırarak hidrasyonu hızlandırmıştır.

Önceki literatür çalışmalarından görüldüğü gibi, farklı mineral katkıları kullanılarak gerçekleştirilmiş birçok çalışma literatürde mevcuttur.

Enerji kaynakları açısından büyük ölçüde dışa bağımlı olan ülkemiz için, enerji tasarruf politikaları büyük bir önem taşımaktadır. Binalarda oldukça yüksek oranda



enerji tüketimine bağlı olarak yapı malzemelerinde yalıtım amaçlı düşük ısı iletkenlik ihtiyacının karşılanması ya da ısı depolama uygulamalarının geliştirilmesi bu politikaları desteklemek için en kolay çözüm yolları arasındadır. Düşük özgül ağırlıklı yapı malzemelerine olan ilgi de bu durumla yakından ilişkilidir.

Diğer taraftan, kolay ve esnek üretim kolaylıkları sunan köpük betonlar doğal ve yerel kaynaklarla üretilebilirliği ile enerji boyutu ilişkilendirildiğinde ülkemiz açısından üzerinde dikkatlice durulması gereken bir yapı malzemesi olduğu açıkça görülebilmektedir. Bunlara bağlı olarak, teknik literatürde doğal ve yerli katkılarla özellikleri iyileştirilmiş köpük beton kullanımlarının yaygınlaştırılmaya yönelik daha çok bilimsel veri oluşturma çalışmalarına da ihtiyaç vardır. Ayrıca, mevcut yapı üzerindeki sabit yükü azaltması bakımından hafif harç plakalarda, söz konusu katkıların (analsim ve klinoptilolit) kullanılması ve yaygınlaştırılmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bilgiler ışığında bu tez çalışması konuyla ilgili ihtiyaçların karşılanması açısından literatürde oldukça önemli bir yere sahip olacağı açıktır.

## **4. MATERYAL VE YÖNTEM**

### **4.1 Materyal**

Bu tez çalışmasında kullanılan materyaller hakkında bazı bilgiler aşağıda verilmektedir.

#### **4.1.1 Portland Çimentosu**

Ocaklardan çıkarılan kalker ve kilin belli oranlarda karıştırılarak döner fırınlarda yüksek sıcaklıkta ısıtılmasıyla elde edilen klinkere, priz süresinin ayarlanmasını sağlayan alçı taşı (kalsiyum sülfat) da eklenmesi ve öğütülmesiyle hidrolük bağlayıcı özellikte portland çimentosu elde edilir.

Bu çalışmada yapılan deneylerde TS EN 197-1 standartlarında olan ve Ünye Çimento Fabrikasından temin edilen, içeriğinde klinker dışında kütlece % 0 - %5 mineral katkı içeren, 28 günlük basınç mukavemeti 42.5 MPa olan ve yüksek erken dayanım kazanan CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır.

#### **4.1.2 Doğal Zeolitler**

Bu çalışmada yapılan deneylerde Manisa/Gördes bölgesinden elde edilen, yüksek saflık oranına sahip (>95) ve dünyada en çok tercih edilen klinoptilolit türü doğal zeolit ile Ordu/Perşembe bölgesinden elde edilen zeolit grubunun klinoptilolitten sonra ikinci değerli minerali olan analsim türü doğal zeolit kullanılmıştır (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).



**Şekil 4.1** Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Klinoptilolit



**Şekil 4.2** Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Analsim

#### **4.1.3 CEN (European Committee for Standardization) Standard Kumu**

Bu çalışmada yapılan deneylerde TS EN 196-1 standartlarına uygun Limak Batı Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş' den alınan CEN Standard kum kullanılmıştır. CEN Standard kum temiz, yuvarlak taneli, granülometrisi uygun ve silisli doğal bir

kumdur (Şekil 4.3). Kullanılan CEN Standard kumunun tane boyut dağılımı Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan CEN Kumu

Çizelge 4.1 CEN Standart Kumu Tane Boyut Dağılımı

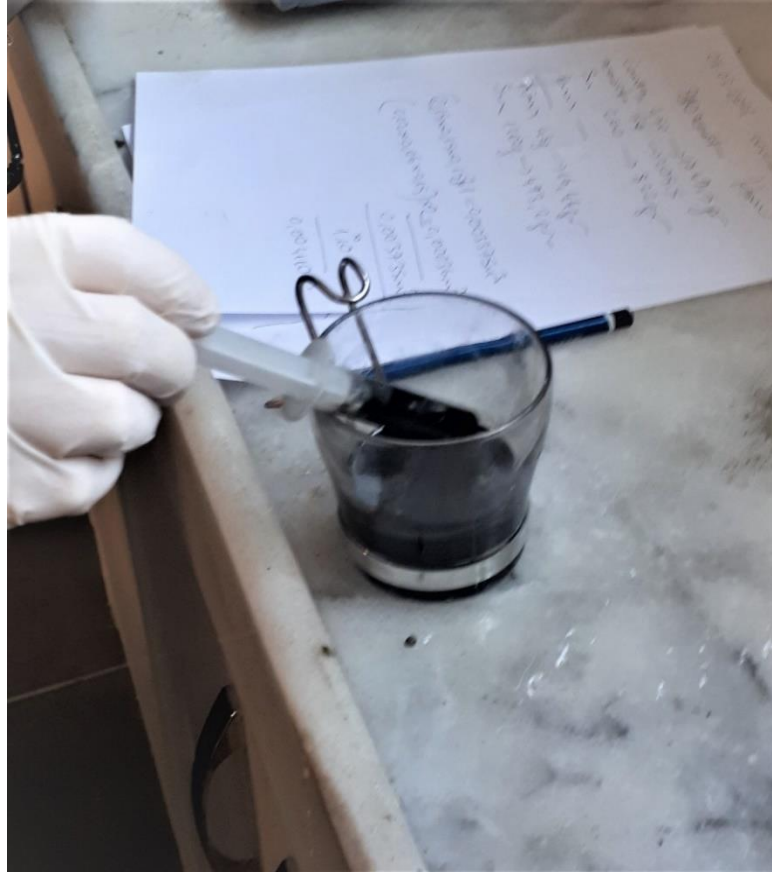
Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Üstü Kümülatif Kalan (%)
0,08	99 ± 1
0,16	87 ± 5
0,5	67 ± 5
1	33 ± 5
1,6	7 ± 5
2	0

#### 4.1.4 Köpük Ajanı

Bu çalışmada yapılan deneylerde kullanılan köpük ajanı Por Yapı Sanayi ve Ticaret A.Ş.’den temin edilmiştir. Söz konusu ajan, büyükbaş hayvanlardan elde edilen hayvansal proteinlerin hidrolize edilmesi ile oluşan protein bazlı Neopor köpük ajandır (Şekil 4.4). Neopor köpük ajanı, boşluklu hafif harç ve beton üretiminde kullanılan, organik, doğa dostu, insan sağlığına zararsız ve antibakteriyel özelliktedir. Kullanılan Neopor köpük ajanının fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2** Neopor Köpük Ajanı Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değer
Özgül Ağırlık	$1.09 \pm 0.01 \text{ gr/cm}^3$
pH	$6.00 \pm 0.5$
Viskozite	$< 20 \text{ cps}$
Tortulaşma v/v %	$< 0.10$
Donma Noktası	$\leq -5.00 \text{ }^\circ\text{C}$



**Şekil 4.4** Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Neopor Köpük Ajanı

#### 4.1.5 Karışım Suyu

Harç ve beton üretiminde kullanılan karışım suyu, çimento ve agregaları işlenebilir hale gelmesi ve daha sonrasında çimentonun hidrasyonunu sağlamak amaçlı kullanılmaktadır. Bu nedenle karışım suyu, TS EN 1008 standartlarına göre içerisinde fiziksel özellikte (sıvı ve katı yağ, renk, koku, asitler, katı madde, organik madde vb.) ve kimyasal özellikte (klorür, sülfat, alkali vb.) betonun zarar görmesine neden olacak miktarda madde içermemelidir.

Bu çalışmada yapılan deneylerde, karışım suyu olarak Ordu ili, Altınordu ilçesi şebeke suyu kullanılmış olup, Ocak ayı analiz raporu Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3** Karışım Suyuna Ait Ocak Ayı Analiz Raporu

Tarih	pH	Serbest Klor	Alüminyum	Demir	Mangan	Nitrit Amonyum	Sertlik	
Ocak	7,87	0,5	0,078	0,01	0,001	0	0	115,3

#### 4.2 Yöntem

Bu çalışmada yapılan deneylerde Neopor köpük ajanı katkısı ve Manisa/Gördes bölgesinden temin edilen klinoptilolit türü doğal zeolit ile Ordu/Perşembe bölgesinden temin edilen analsim türü doğal zeolitin farklı oranlarında (%0, %10, %30, %50) Portland çimentosuyla yer değiştirilmesiyle üretilen hafif hamur ile hafif harç plakalarından oluşan 14 adet deney serisi elde edilmiştir. Hafif hamur ve hafif harç plaka numuneleri üzerinde fiziksel, mekanik ve ısı (termal) özellik tespit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Ordu Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Yapı ve Malzeme Laboratuvarı ile Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır.

##### 4.2.1 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Fiziksel, Kimyasal ve Minerolojik-Petrografik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Klinoptilolit numunesi, Manisa ili, Gördes ilçesinden “Gördes Zeolit Madencilik San. ve Tic. A.Ş.” tarafından inceltirilmiş halde, analsim numunesi ise Ordu ili, Perşembe ilçesinden temin edilmiştir. Analsim numuneleri ASTM C 430 standardına uygun olarak 45 µm göz açıklıklı elekten yaklaşık %80'i geçecek şekilde bilyalı değirmende öğütülerek inceltirilmiş halde deneylerde kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan Portland çimentosu için belirlenmiş tüm özellikler Ünye Çimento A.Ş.'den elde edilmiştir. Çalışmadaki katkılı çimentoların fiziksel özellikleri daha önce gerçekleştirilmiş tez çalışmasından alınmıştır (Yılmaz, 2018). Doğal zeolit klinoptilolit ve analsimin özgül ağırlık ve su emme oranları TS EN 197-1 standardına uygun olarak belirlenmiştir.

Doğal zeolit klinoptilolit kimyasal içeriği XRF (X-Rays Fluorescence Spectrometer) yöntemiyle belirlenmiştir. Söz konusu kimyasal içerik zeolitin temin edildiği firmadan alınmıştır. Analsimin kimyasal içeriği Votorantim Çimento A.Ş. tarafından yine XRF yöntemiyle belirlenmiştir. Klinoptilolit ve analsim numunelerinin

mineral yapıları XRD (X-Işınları Difraksiyon) analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Klinoptilolit ve analsim toz halindeki numuneleri üzerinde genel morfolojik yapının belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu kullanılarak SEM (Scanning Electron Microscope) görüntüleri alınmıştır.

#### 4.2.2 Zeolitlerin Puzolanik Aktivite Deneyleri ve Numunelerin Hazırlanışı

Zeolitlerin puzolanik aktivite deneyleri TS 25'e göre yapılmıştır. Buna göre, puzolanik aktivite deneyleri, puzolanların belirli bir incelikte öğütülerek su ve kalsiyum hidroksitle karıştırılması sonucunda üretilen harç numunelerinin basınç dayanımı değeri ile belirlenmektedir.

Her iki zeolitin puzolanik aktivite deneyleri için kullanılan malzeme miktarları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu malzeme miktarları ile prizmatik numuneler üretilmiştir. Numuneler kalıplarında buharlaşmayı önlemek amacıyla cam plakalar ile üstleri kapatılarak 24 saat (23±2)°C oda sıcaklığında bekletilmişlerdir. Ardından 6 gün süresince etüvde (55±2)°C sıcaklıkta muhafaza edilmişlerdir. Süre sonunda etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmışlardır. Kalıplardan çıkarılan numuneler üzerinde TS EN 196-1 standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

**Çizelge 4.4** Deneylerde Kullanılan Malzeme Miktarları

	TS 25	Miktar	
		Klinoptilolit	Analsim
Sönmüş Kireç (CaOH <sub>2</sub> )	150 g	150 g	150 g
Puzolan	2x150x(puzolan öz.ağ. / (CaOH <sub>2</sub> ) öz. ağı. (g))	2x150x(2.11/2.15)=294.42 g	2x150x(2.28/2.15)=318.14g
Standart Kum	1350 g	1350 g	1350 g
Su	0.5x(150+puzolan) (g)	0.5x(150+294.42)=222.21 g	0.5x(150+318.14)=234.07g

#### 4.2.3 Hamur ve Harç Plakalar Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Yöntemleri

##### 4.2.3.1 Hamur ve Harç Plakaların Bileşimleri

Bu çalışmada, daha önce de belirtildiği gibi, 7 adet hamur ve 7 adet harç plaka numune olmak üzere toplam 14 adet deney serisi üretilmiştir. Bu deney serilerine ait

açıklayıcı bilgiler Çizelge 4.5’te verilmektedir. Hamur ve harç plakalara ait bileşimler (1 m<sup>3</sup> için) ise Çizelge 4.6a ve Çizelge 4.6b’de verilmektedir.

Harç plaka numunelere ait bileşimlerde hamur plaka numunelerinkinden farklı olarak standart CEN kumu kullanılmıştır.

**Çizelge 4.5** Hamur ve Harç Plakalara Ait Açıklayıcı Bilgiler

Hamur ve Harç Plakaların İsimleri	Açıklayıcı Bilgiler
P0	CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu hamur (geleneksel)
PC10	Ağırlıkça %10 oranında klinoptilolit yer değiştirmeli hamur
PC30	Ağırlıkça %30 oranında klinoptilolit yer değiştirmeli hamur
PC50	Ağırlıkça %50 oranında klinoptilolit yer değiştirmeli hamur
PA10	Ağırlıkça %10 oranında analsim yer değiştirmeli hamur
PA30	Ağırlıkça %10 oranında analsim yer değiştirmeli hamur
PA50	Ağırlıkça %10 oranında analsim yer değiştirmeli hamur
M0	CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu harç (geleneksel)
MC10	Ağırlıkça %10 oranında klinoptilolit yer değiştirmeli harç
MC30	Ağırlıkça %30 oranında klinoptilolit yer değiştirmeli harç
MC50	Ağırlıkça %50 oranında klinoptilolit yer değiştirmeli harç
MA10	Ağırlıkça %10 oranında analsim yer değiştirmeli harç
MA30	Ağırlıkça %10 oranında analsim yer değiştirmeli harç
MA50	Ağırlıkça %10 oranında analsim yer değiştirmeli harç

**Çizelge 4.6a** Hamur Plakalara Ait Bileşimler (1 m<sup>3</sup> için)

Hamur Karışımları	P0	PC10	PC30	PC50	PA10	PA30	PA50
Portland Çimentosu (kg/m <sup>3</sup> )	500	450	350	250	450	350	250
Zeolit (kg/m <sup>3</sup> )	0	50	150	250	50	150	250
Su (kg/m <sup>3</sup> )				200			
Su/Çimento Oranı				0,40			
Köpük Ajantı (kg/m <sup>3</sup> )				4			
Su (kg/m <sup>3</sup> )*				120			

\* Köpük ajanını etkinleştirmek için kullanılan su miktarı.



**Çizelge 4.6b** Harç Plakalara Ait Bileşimler (1m<sup>3</sup> İçin)

Harç Karışımları	M0	MC10	MC30	MC50	MA10	MA30	MA50
Portland Çimentosu (kg/m <sup>3</sup> )	500	450	350	250	450	350	250
Zeolit (kg/m <sup>3</sup> )	0	50	150	250	50	150	250
Su (kg/m <sup>3</sup> )				200			
Su/Çimento Oranı				0.40			
CEN Kum (kg/m <sup>3</sup> )				500			
Köpük Ajanı (kg/m <sup>3</sup> )				4			
Su (kg/m <sup>3</sup> )*				120			

\* Köpük ajanını etkinleştirmek için kullanılan su miktarı.

#### 4.2.3.2 Hamur ve Harç Plakaların Üretimi ve Saklama Koşulları

Çizelge 4.6a ve Çizelge 4.6b'den görüldüğü gibi, hamur ve harç plakaların bileşimlerindeki malzeme miktarları 1 m<sup>3</sup> için hesaplanmıştır. Burada, su/çimento oranı; 0.40, çimento/kum oranı; 1:1, köpük ajanı/su oranı; 1:30'dur. Yapılan hesaplamalara göre, Şekil 4.5'teki hassas terazi ile malzeme tartımları yapılmıştır.



**Şekil 4.5** Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Hassas Terazi

Tüm numuneler TS EN 196-1'e uygun olarak üretilmiştir. Hassas terazi ile malzeme tartımları yapılarak öncelikle bağlayıcı malzemeler kaba konulmuş, üstlerine karışım suyu eklenmiştir (Şekil 4.6). Harç numunelerde CEN standart kumu da ayrıca ilave edilmiştir. Daha sonra Şekil 4.7'de gösterilen şekilde mala yardımıyla 60 saniye elle karıştırılarak şekildeki kıvam elde edilmiştir.



**Şekil 4.6** Portland Çimentosu ve Doğal Zeolit Karışımı



**Şekil 4.7** Numunelerin Kıvamına İlişkin Görünüm

Elde edilen hamur ve/veya harç karışımlarına köpük ajanı ve su (köpük ajanını etkinleştirmek için) ayrı bir kapta köpük mikseri yardımıyla patlatılarak köpük Şekil 4.8'deki köpük karışımı eklenmiştir. Daha sonra Şekil 4.9'daki hamur ve harç karıştırma cihazına yerleştirilmiştir. Karışım dakikada 40 devir yapacak hızda 5 dakika boyunca çevrilmiştir.



**Şekil 4.8** Köpük Ajanı ile Oluşturulmuş Köpük



**Şekil 4.9** Hamur ve Harç Karıştırma Cihazı

Karıştırıcıdan alınan köpük ilaveli hamur ve harç karışımı mala kullanılarak kıvam kontrolü yapılmıştır. (Şekil 4.10).



**Şekil 4.10** Köpük İlaveli Hamur ve/veya Harç Karışımı

Kıvam kontrolü yapılan karışım kolay çıkması için yağlanmış Şekil 4.11'deki 20x60x150 mm boyutlarında plaka numune kalıplarına dökülmüştür. Daha sonra kalıplara dökülen numunelerin üstleri mala yardımıyla düzeltilmiş ve plastik tokmak yardımıyla yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 4.12).



**Şekil 4.11** Hamur ve/veya Harç Plaka Kalıpları (20x60x150 mm)



**Şekil 4.12** Plaka Kalıba Yerleştirilmiş Hamur ve/veya Harç Numunesi

Üretilen hamur ve/veya harç karışımları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki 150x150x150 mm standart küp kalıplara da yerleştirilmişlerdir. Söz konusu numuneler

üzerinde hazırlanan karışımların boşluk yapısı ve dayanımlarını belirlemek amacıyla ultrasonik ses dalgası geçiş hızı (UPV, ultrasonic pulse velocity) yöntemiyle deneyler yapılmıştır.



**Şekil 4.13** Hamur ve/veya Harç Numunesinin Küp Kalıba Yerleştirilme Anı



**Şekil 4.14** Küp Kalıba Yerleştirilmiş Hamur ve/veya Harç Numunesi

Kalıplara yerleştirilen numunelerin takip edilebilir olması için her bir numune özelliklerine göre isimlendirilmiştir (Şekil 4.15).



**Şekil 4.15** İsimlendirilmiş Hamur ve/veya Harç Numuneleri

Numuneler kuruması için  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta laboratuvar ortamında bırakılmıştır. 48 saat kalıplarda bekletilmişlerdir. Daha sonra numuneler kompresör yardımıyla kalıpların altındaki deliklerden hava basılarak kalıplardan çıkarılmıştır (Şekil 4.16). Kalıplardan çıkarılan numuneler 24 saat  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta hava ortamında bekletilmiştir. Ardından 4 gün boyunca da  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta su küründe tutulmuştur. Su küründen çıkarılan numuneler 21 gün boyunca hava kürüne tabi tutulmuştur. Numuneler toplamda kalıpta (2 gün), havada (1 gün), suda (4 gün) ve havada (tekrar) (21 gün) olmak üzere toplamda 28 gün deney anına kadar kürlenmişlerdir.(Şekil 4.17).



Şekil 4.16 Deney Numunesinin Kalıptan Çıkarılması



Şekil 4.17 Numunelere Ait Genel Bir Görünüm



#### 4.2.3.3 Mini Çökme (Slump) ve Yayılma Deneyi

Karışımlar üzerinde mini çökme (slump) ve yayılma deneyi ile kıvam belirlenmiştir. Söz konusu deney TS EN 12350-2'e göre gerçekleştirilmiştir. Deneyde üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm ve yüksekliği 60 mm' lik kesik koni kullanılmıştır. Kesik konu içerisine 3 tabaka halinde olmak üzere karışım doldurulmuştur. Her tabakada çelik çubuk kullanılarak 25 vuruş ile şişleme yapılmıştır (Şekil 4.18). Karışım ile dolu koninin üzeri mala yardımıyla tesviye edilmiştir. Daha sonra kesik konu dik konumda olmak üzere yukarıya hızlıca çekilmiştir. Çökme ve yayılma miktarı cetvel yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 4.19).



Şekil 4.18 Deney Anındaki Şişleme İşlemi



Şekil 4.19 Deney Anındaki Yayılma Miktarının Ölçümü

#### 4.2.3.4 Özgül Ağırlık Deneyi

Bu çalışmada üretilen hamur ve/veya harç plaka numuneleri üzerinde özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. 28 gün kürlenmiş deney serilerine ait numuneleri suya doygun kuru yüzeyli (DKY) ve kuru özgül ağırlıklarını belirlemek için Şekil 4.20’de verilen özgül ağırlık sehpası kullanılmıştır.



Şekil 4.20 Deneyel çalışmalarda kullanılan Özgül Ağırlık Sehpası

#### 4.2.3.5 Su Emme Oranı Tespit Deneyi

Hamur ve harç plaka numuneleri üzerinde su emme deneyi yapılmıştır. Bu deneyde numunenin su ile temasta kaldığı halde iç yapıdaki suyun donması sonucu oluşacak buz kristallerinin genişleyebileceği herhangi bir hacmin olup olmadığının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Su emme oranı düşük olan malzemeler donmaya karşı daha sağlam yapıdadır. Su emme oranı;

$W_k$  : Numunenin kuru ağırlığını,

$W_d$  : Numunenin suya doygun ağırlığını göstermek üzere,

$$\text{Su emme oranı} = \frac{W_d - W_k}{W_k} \cdot 100 \quad (4.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

#### 4.2.3.6 Termal (Isıl) Performans Tespit Deneyleri

Üretilen hafif hamur ve harç plakaların termal performanslarını belirlemek amacıyla ısı iletkenlik katsayıları ( $k$ ), ısı depolama değerleri ( $c_p$ ,  $C$ ) ve ısı yayılım katsayıları ( $\alpha$ ) Dicle Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında, TS EN ISO 8990 ve ISO 6946 standartlarında belirtildiği şekilde ISOMET marka 2104 model cihaz ile ölçülmüştür. Şekil 4.21’de gösterilen cihaz kolay ölçüm yapabilmesi ve ölçüm yaparken numune içeriğinde herhangi bir nem oluşturmaması ile numunelerin küçük boyutta ve homojen yapıda olmaması nedeniyle tercih edilmiştir. Ölçümleri DIN 51046 ve TS EN 993-15 normuna göre sıcak tel yöntemiyle ölçen cihaz, ısı iletim katsayısını 0.02-0.06 W/mK aralığında ve %5 hassasiyetle, hacimsel özgül ısı kapasitesini ise  $4 \times 10^4$ - $4.0 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>K aralığında ve %15 hassasiyetle ayrıca -20°C ile +70°C arasında ve 1°C hassasiyetle ölçüm yapmaktadır. Ölçümler, oda sıcaklığında yapılmış olup numune üzerinde bulunan 5 farklı noktadan elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.

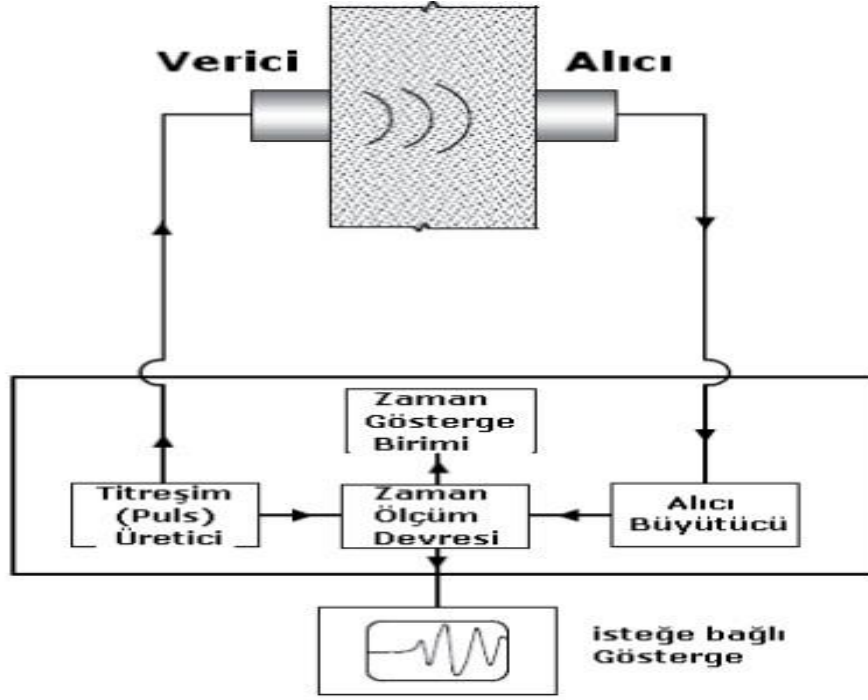


Şekil 4.21 Termal Performans Ölçümlerinin Yapıldığı Cihaz

#### 4.2.3.7 Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (UPV) Tayini Deneyi

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrasonik ses geçiş hızı tayini deneyi, numuneye gönderilen ses dalgalarının bir ucundan diğer ucuna geçiş süresi ölçülmesi sonucu dalga hızının hesaplanmasıyla belirlenmektedir (Şekil 4.22). Ölçülen ses dalgası hızı sayesinde beton basınç dayanımı ve diğer özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Ses dalgalarının geçiş hızı, numunenin özgül ağırlığına, boşluk durumuna, çatlak yapısına,

çimento türüne, içerdiği katkı maddelerine ve homojenliği gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.23'te UPV ölçüm cihazı ve deney numunesi görülmekte olup TS EN 12504-4 ve ASTM C 597 standartlarında belirtildiği şekilde ölçümler yapılmıştır.



Şekil 4.22 Ultrasonik Hız Devresinin Şematik Diyagramı (Tarun ve ark., 2004).



Şekil 4.23 UPV Ölçüm Cihazı ve Deney Numunesi

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Portland Çimentosu ve Doğal Zeolitlerin Özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan Portland Çimentosu ve doğal zeolitlere ait bazı bulgu ve tartışmalar aşağıda verilmektedir.

#### 5.1.1 Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan kullanılan CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Ünye Çimento A.Ş. malzeme laboratuvarında yapılan deney sonuçlarından elde edilmiş olup Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1** Portland Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Ağırlıkça (%)	Portland Çimentosunun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	
SiO <sub>2</sub>	19.68	Özgül ağırlık, (g/cm <sup>3</sup> )	3.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.37	Priz başlangıcı, dk.	162
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.36	Priz sonu, dk.	268
CaO	62.57	Hacim genişmesi, mm	1.00
MgO	0.96	Blaine özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3313
SO <sub>3</sub>	2.70	2 gün. basınç dayanımı, MPa	32.10
Kızdırma kaybı	4.14	7 gün. basınç dayanımı, MPa	41.30
		28 gün. basınç dayanımı, MPa	48.70

Deneysel çalışmalarda kullanılan doğal zeolit klinoptilolit numunesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (XRF analizi ile belirlenen) üretim ve satışının yapıldığı Gördes Zeolit Madencilik San. Ve Tic. A.Ş. tarafından elde edilmiş olup, doğal zeolit analsim numunesinin fiziksel özellikleri kimyasal özellikleri (XRF analizi ile belirlenen) ise Votarantim Çimento A.Ş. malzeme laboratuvarında yapılan testler sonucunda elde edilmiş ve Çizelge 5.2 ile Çizelge 5.3’de verilmiştir.

**Çizelge 5.2** Portland Çimentosu ve Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	Portland Çimento	Klinoptilolit	Analsim
Özgül Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	3110	2110	2280
Blaine İnceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3313	4079	4780

**Çizelge 5.3** Doğal Zeolit Klinoptilolit ve Analsim' in Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Klinoptilolit (%)	Analsim (%)
SiO <sub>2</sub>	64.70	46.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.21	17.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.38	9.21
CaO	2.08	3.03
MgO	0.79	5.29
NaO <sub>2</sub>	0.38	4.84
K <sub>2</sub> O	3.78	4.08
Kızdırma Kaybı	11.80	7.00

### 5.1.2 Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

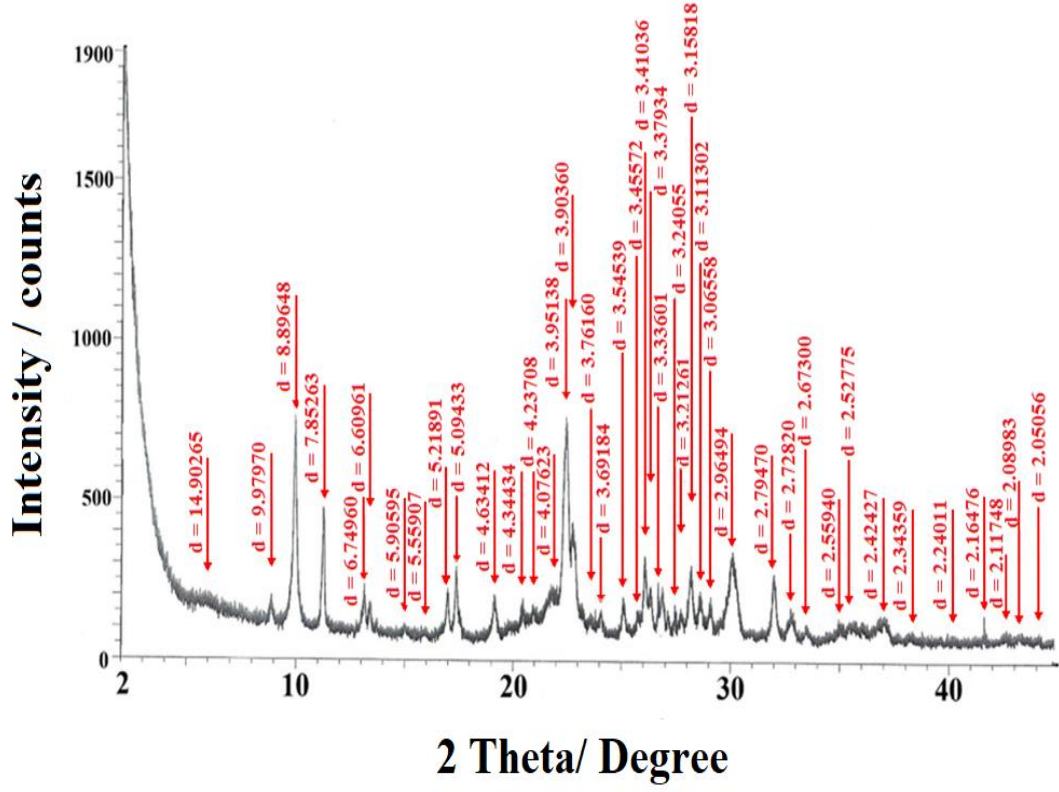
Klinoptilolit numunesinin temin edildiği Gördes Zeolit Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'nin malzeme laboratuvarında XRD (X-Işınları Difraksiyon) analizi ile tespit edilen klinoptilolit numunesinin mineralojik bileşimi Çizelge 5.4'te verilmiştir.

**Çizelge 5.4** Klinoptilolit Numunesinin Mineralojik ve Petrografik Bileşimi

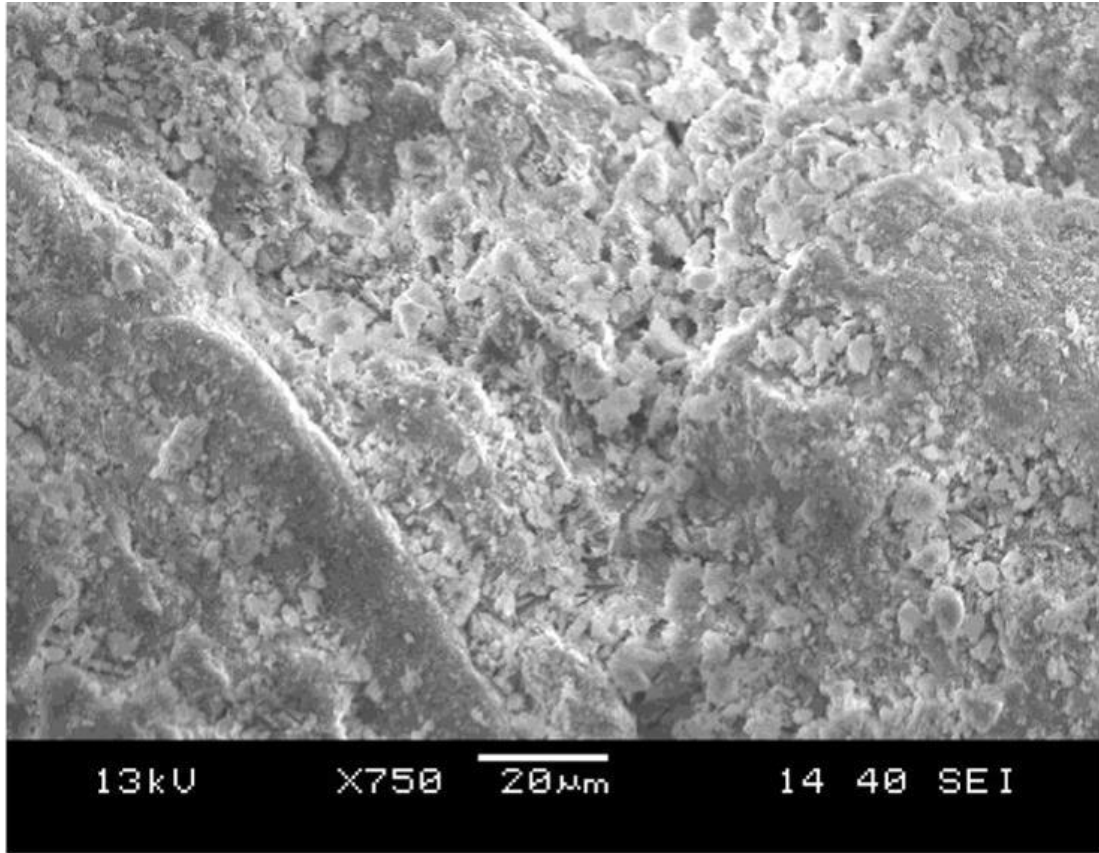
%	İçerik	Mineral Grubu
80-85	Klinoptilolit	Zeolit
10-15	Opal/Kristobalit/Tridimit	Silikat/Silis
<5	İllit-Mika	Silikat/Kil/Mika
<2	Na ve K-Feldspat	Silikat/Feldspat
<2	Kuvars	Silikat/Silis

Çizelge 5.4'te belirtilen sonuçlara göre deneysel çalışmada kullanılan numune büyük oranda (%80-85 aralığında) klinoptilolit ihtiva etmektedir. Silis grubu minerallerinden olan Opal/Kristobalit/Tridimit içeriği %10-15 oranında tespit edilmiştir. Buna karşın illit-mika, feldspat ve kuvars içeriği numunede çok düşük oranlarda (%2-5) bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan klinoptilolit numunesinin genel kullanım standartlarında olduğu tespit edilmiştir.

Gördes Zeolit Madencilik San. ve Tic. A.Ş. tarafından yapılan klinoptilolit numunesine ait XRD analizi Şekil 5.1'de ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesi sonucu gözlemlenen SEM görüntüsü Şekil 5.2'de yer almaktadır.



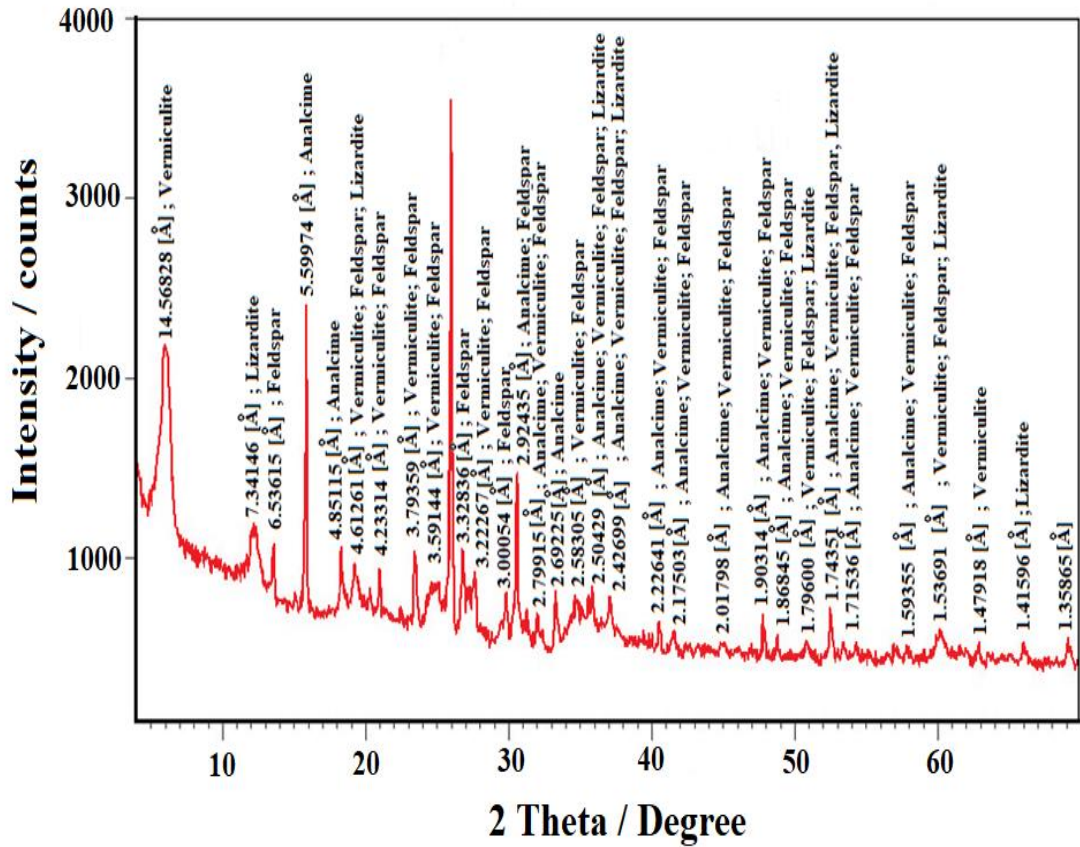
Şekil 5.1 Deneylerde Kullanılan Klinoptilolit Numunesinin XRD Pikleri



Şekil 5.2 Deneylerde Kullanılan Klinoptilolit Örneğinin SEM Görüntüsü

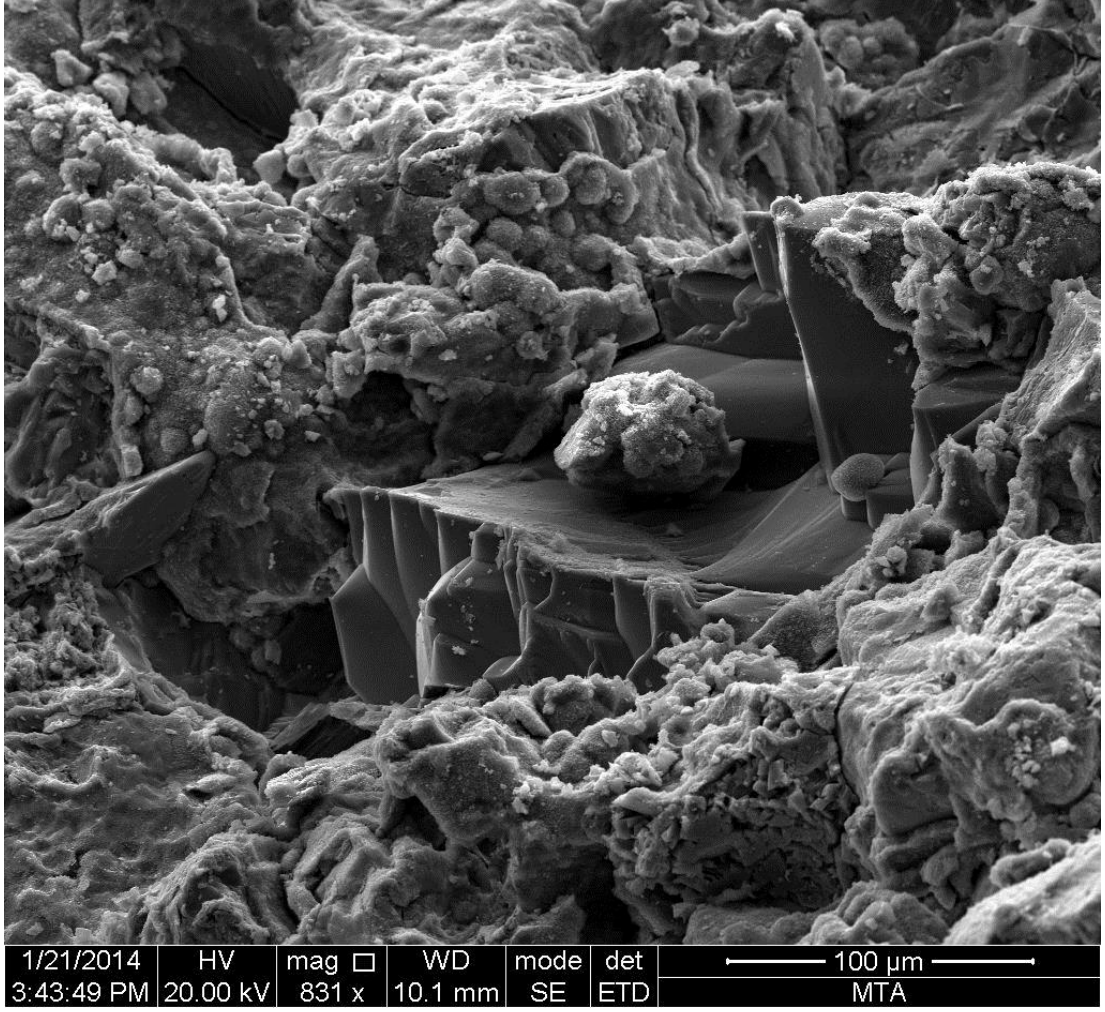
Analsim numunesinin mineralojik özellikleri KTÜ Maden Mühendisliği malzeme laboratuvarında incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda analsim numunesinin kayaçal bünyesinde cam kıymıkları ve kristal bileşenlerden oluşan vitrik tuf olduğu ve içerisindeki cam kıymıkları yoğunlukla başkalaşmış zeolit ve klorite dönüşmüştür. Ayrıca bağlayıcı malzeme içerisinde bazı yerlerde kriptokristalen silis oluşumlarına da rastlanmıştır. Analsim bünyesinde bulunan kristal bileşimler ise yoğunlukla ayrıışmış ojit (piroksen) ve küçük oranda biyotit ihtiva etmektedir. Buna ilaveten porfir içeriğinde %5'ten az oranda bulunan opak mineraller öz şekli olmayan kristal formunda bulunmaktadır.

Analsim numunesinin XRD analizi Şekil 5.3'te ve MTA Genel Müdürlüğü, Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarında taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesi sonucu gözlemlenen SEM görüntüsü Şekil 5.4'te yer almaktadır.



Şekil 5.3 Deneylerde Kullanılan Analsim Numunesinin XRD Pikleri





Şekil 5.4 Deneylerde Kullanılan Analsim Örneğinin SEM Görüntüsü

### 5.1.3 Doğal Zeolitlerin Puzolanik Aktiviteleri

Çalışmada kullanılan doğal zeolitlerin puzolanik aktivitelerinin belirlenmesi TS 25 standardına uygun olarak yapılmaktadır. Buna göre, kireç-puzolan karışımı ile elde edilen numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının 4 MPa değerinden büyük olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan doğal zeolitler TS 25'in sınır değerlerine uygun puzolanik aktivite özelliklerine sahiptir. Bu bulgu sonuçların değerlendirilmesi amaçlı olarak aynı zeolit katkıları kullanılarak gerçekleştirilen daha önceki tez çalışmalarından elde edilmiştir (Yazıcıoğlu, 2016). Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, klinoptilolit numunesi için basınç dayanımına bağlı puzolanik aktivite değeri 9.02 MPa, analsim numunesi için ise 6.30 MPa'dır. Diğer taraftan, TS 25 standardında belirtilen bir diğer uygunluk kriteri de doğal puzolanların içerdiği Si, Al, ve Fe oksitleri toplam miktarı ağırlıkça %70 oranından fazla olması

gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan klinoptilolit için bu değer %77.30 iken, analsim için %73.16 olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, karışımlarda kullanılacak puzolanların Blaine inceliğinin 3000 cm<sup>2</sup>/g' den fazla olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan doğal puzolan klinoptilolit Blaine inceliği 4079 cm<sup>2</sup>/g, analsimin ise 4780 cm<sup>2</sup>/g olarak tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen verilerden görüldüğü gibi, klinoptilolit ve analsim numunelerinin TS 25 standartına uygun olduğu ve katkılı çimento karışımlarında kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 5.5 Zeolitlerin Puzolanik Aktivite Değerleri (Akgün ve Yazıcıoğlu, 2020)**

<b>Puzolanik Aktivite Değerleri</b>		
<b>TS 25 sınıır değerleri</b>	<b>Klinoptilolit</b>	<b>Analsim</b>
Kireç-puzolan karışımı 7 günlük basınç dayanımı > 4 MPa	9.02	6.30
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ağırlıkça > %70	77.30	73.16
Blaine inceliği > 3000cm <sup>2</sup> /g	4079	4780

## **5.2 Hafif Hamur Plaka Numunelerine Ait Bulgular ve Tartışma**

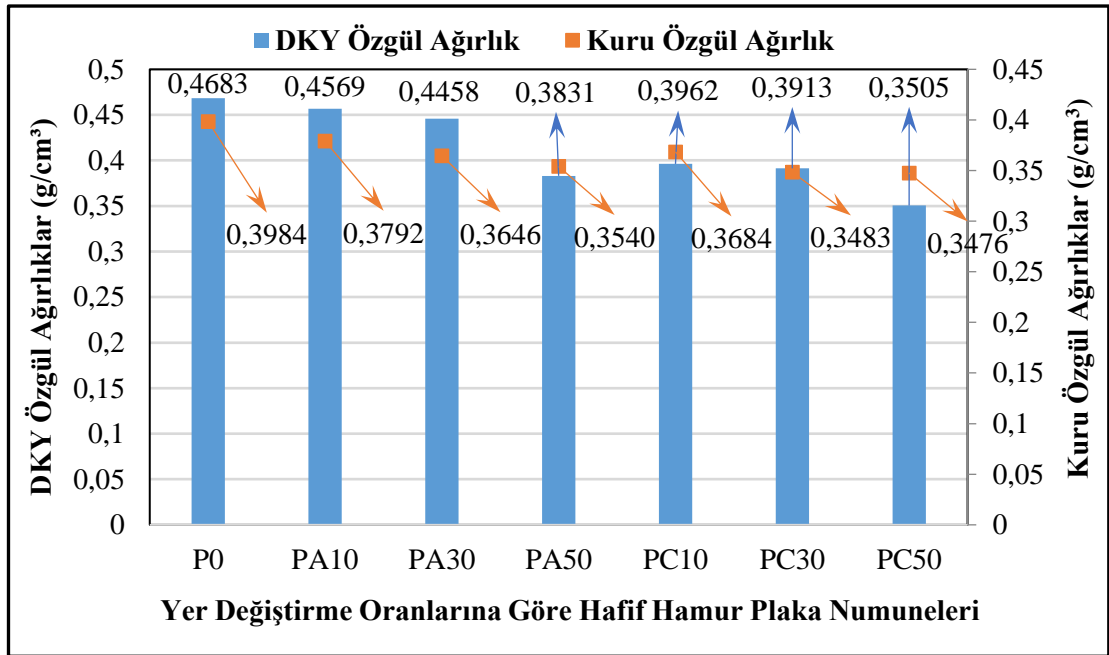
Hafif hamur plaka numunelerine ait bazı bulgular ve bunların tartışmaları aşağıda verilmektedir.

### **5.2.1 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Özgöl Ağırlık, Su Emme ve Mini Slump Değerleri**

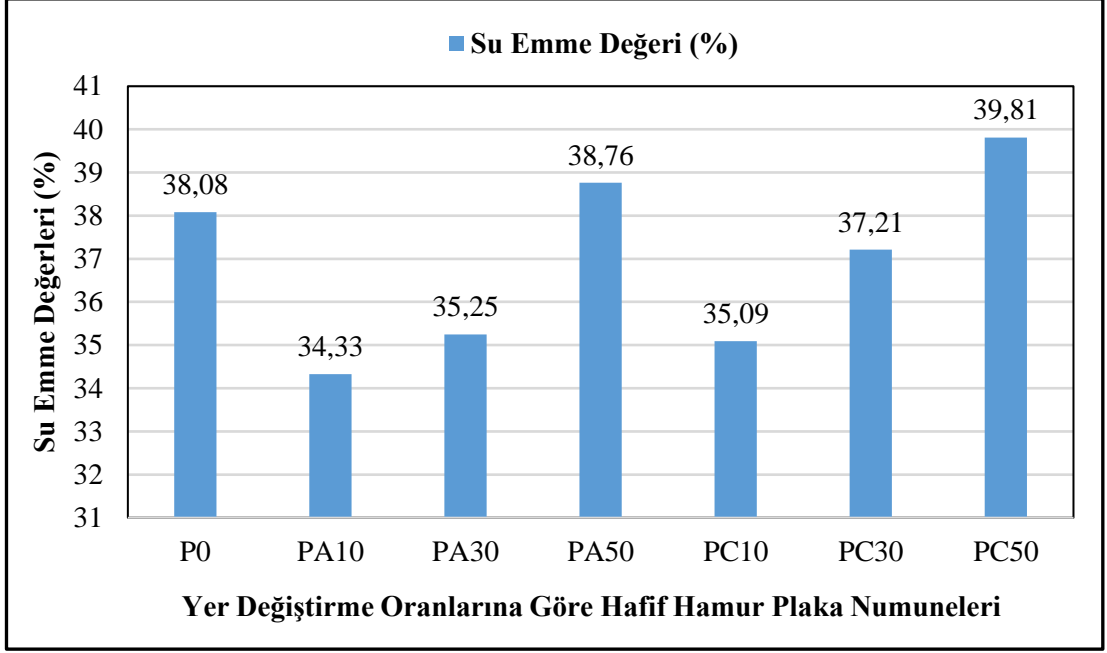
Deneysel çalışmalarda Portland çimentosunun doğal zeolit klinoptilolit ve analsim ile %0, %10, %30, %50 oranlarında yer değiştirilmesi ve köpük ilavesiyle üretilen hafif hamur plaka numunelerinin doğgun kuru yüzeyle (DKY), kuru özgöl ağırlıkları, su emme değerleri ve mini slump deneyi sonuçları Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bulgulara ait değişim grafikleri ise Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri

Hafif Hamur Plaka Numuneleri	Özgül Ağırlıkları (g/cm <sup>3</sup> ) (28 Günlük)		Su Emme (%)
	DKY	Kuru	
P0	0.4683	0.3984	38.08
PA10	0.4569	0.3792	34.33
PA30	0.4458	0.3646	35.25
PA50	0.3831	0.3540	38.76
PC10	0.3962	0.3684	35.09
PC30	0.3913	0.3483	37.21
PC50	0.3505	0.3476	39.81



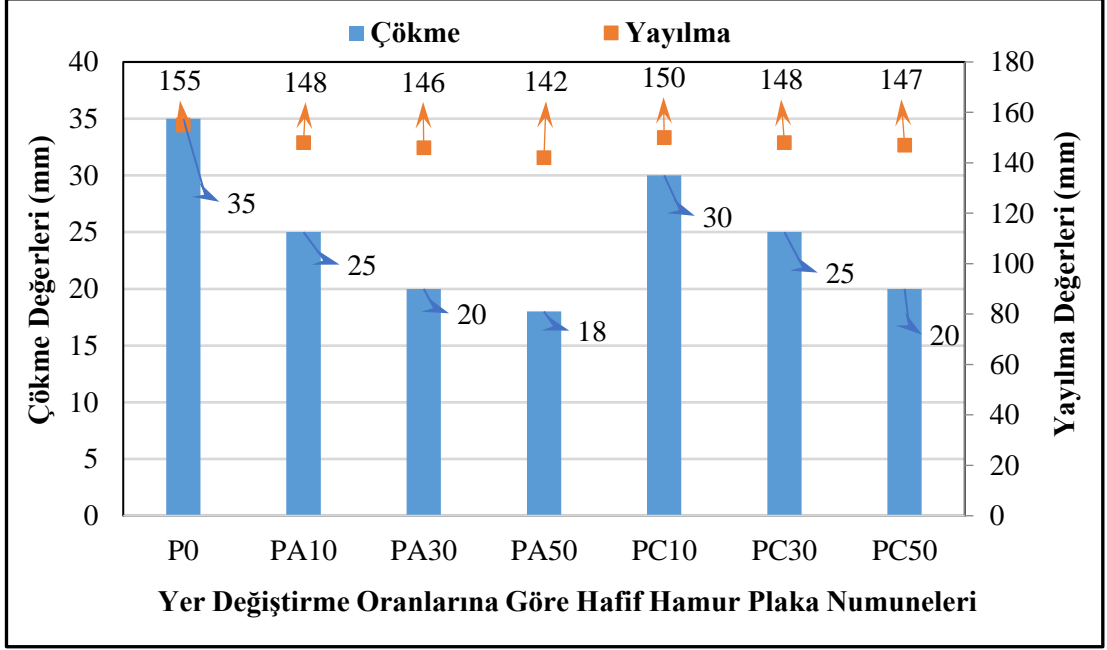
Şekil 5.5 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin DKY ve Kuru Özgül Ağırlık Değerleri



Şekil 5.6 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Su Emme Değeri

Çizelge 5.7 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Mini Slump Değeri

Hafif Hamur Plaka Numuneleri	Çökme (mm)	Yayılma (mm)
P0	35	155
PA10	25	148
PA30	20	146
PA50	18	142
PC10	30	150
PC30	25	148
PC50	20	147



**Şekil 5.7** Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Mini Slump Deney Sonuçları Değişimleri

Çizelge 5.6’da verilen hafif hamur plakaların özgül ağırlıkları incelendiğinde, analsim ve klinoptilolit mineral katkıları için yer değiştirme oranlarına göre benzer değişim karakteristiği gözlenmektedir.

Geleneksel hafif hamur plaka numuneleri ile analsim yer değiştirmeli hamurların (P0, PA10, PA30, PA50) DKY özgül ağırlıkları sırasıyla %2.50, %5.05, %22.2 ve kuru özgül ağırlıkları %5.06, %9.27, %12.54 azalmıştır.

Geleneksel hafif hamur plaka numuneleri ile klinoptilolit yer değiştirmeli hamurların (P0, PC10, PC30, PC50) DKY özgül ağırlıkları sırasıyla %18.20, %19.68, %33.61 ve kuru özgül ağırlıkları %8.14, %14.38, %14.61 azalmıştır.

Hamur numunelerdeki bu azalma eğilimlerinin nedeni analsim ve klinoptilolit katkıların özgül ağırlarının Portland çimentosunun özgül ağırlığına göre daha düşük olmasıdır (Çizelge 5.2).

Geleneksel hafif hamur plaka numuneleri ile analsim yer değiştirmeli hamurların (P0, PA10, PA30, PA50) su emme değerleri sırasıyla %10.92 %8.03 azalmıştır fakat PA50 deney serisine ait numuneleri P0’a göre %1.75 artmıştır.

Geleneksel hafif hamur plaka numuneleri ile klinoptilolit yer değiştirmeli hamurların (P0, PC10, PC30, PC50) su emme değerleri sırasıyla %8.52, %2.34 azalmıştır fakat PC50 deney serisine ait numuneleri P0’a göre %4.35 artmıştır.

Deney sonuçlarına göre %50 yer değiştirme oranında referans numunelerinden su emme değerlerinin bir miktar yüksek olmasının nedeni, her iki zeolit katkı sayesinde çimento hamurunda daha yoğun bir ortamın meydana gelmesidir.

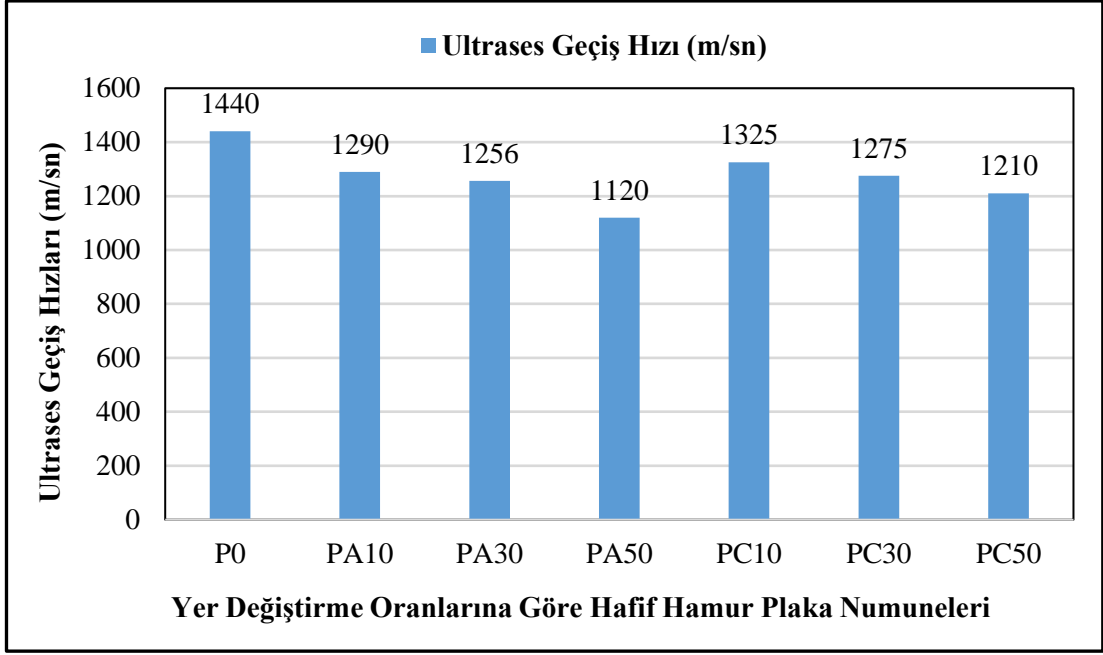
Hafif hamur plaka numunelerde mini slump deney sonuçları değerlendirildiğinde, analsim katkılı numunelerin çökme ve yayılma değerleri klinoptilolit katkılı numunelerinkinden bir miktar daha düşüktür. Bu durum her iki zeolitin inceliklerine bağlı olarak oluşmaktadır. Diğer taraftan, her iki zeolit katkılı hamur numuneleri çökme ve yayılma değerleri geleneksel Portland çimentolu hamur numunelerinkinden daima düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, analsim ve klinoptilolitin Blain incelik değerlerinin Portland çimentosununkinden daha yüksek olmasıdır.

### 5.2.2 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Ultrasonik Ses Geçiş Hızları

Deneysel çalışmalarda Portland çimentosunun doğal zeolit klinoptilolit ve analsim ile %0, %10, %30, %50 oranlarında yer değiştirilmesi ve köpük ilavesiyle üretilen hafif hamur plaka numunelerinin ultrases geçiş hızları Çizelge 5.8’de ve ultrases geçiş hızlarına ilişkin değişim grafiği ise Şekil 5.8’de verilmiştir.

**Çizelge 5.8** Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızları

Hafif Hamur Plaka Numuneleri	Kuru Yoğunluklar (kg/m <sup>3</sup> )	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Basınç Dayanımı (MPa)
P0	398.4	1440	1.90
PA10	379.2	1290	1.70
PA30	364.6	1256	1.65
PA50	354.0	1120	1.52
PC10	368.4	1325	1.80
PC30	348.3	1275	1.73
PC50	347.6	1210	1.58



**Şekil 5.8** Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı Değişim Grafiği

28 günlük kuru yoğunluklara sahip küp numuneler üzerinde uygulanan UPV değerlerinin tespit deney sonuçlarına göre yer değiştirmesiz geleneksel hafif hamur plaka numuneleri (P0) UPV değerleri analsim ve klinoptilolit katkı yer değiştirmeli numunelerinkinden (PA10, PA30, PA50, PC10, PC30, PC50) çok az bir farkla sırasıyla %11.63, %14.65, %28.57, %8.68, %12.94, %19.01 daha büyüktür. Klinoptilolit katkılı numunelerin (PC10, PC30, PC50) UPV değerleri, analsim katkılı numunelerin (PA10, PA30, PA50) UPV değerlerinden sırasıyla %2.71, %1.51, %8.04 daha büyüktür.

Küp numunelerin basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında yukarıda verilen UPV değerleri için yapılmış tartışmadaki değişim eğilimleri yaklaşık aynıdır. Buna göre tüm hafif hamur plaka numuneleri basınç dayanım değerleri 1.52-1.90 MPa arasındadır. Deney sonuçları TS EN 13655’ de verilen 1.5 MPa sınır değeri ile uyumludur. Yer değiştirmesiz geleneksel hafif hamur plaka numunelerin (P0) basınç dayanımı değerleri analsim ve klinoptilolit yer değiştirmeli numunelerinkinden (PA10, PA30, PA50, PC10, PC30, PC50) çok az bir farkla sırasıyla %11.76, %15.15, %25, %5.56, %9.83, %20.25 daha büyüktür. Klinoptilolit katkılı hamur numunelerin (PC10, PC30, PC50) basınç dayanım değerleri, analsim katkılı numunelerinkinden (PA10, PA30, PA50) sırasıyla %5.88, %4.85, %3.95 daha büyüktür. 28 günlük klinoptilolit katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri analsim katkılı

numunelerinkinden çok az bir farkla daha yüksek olmasının nedeni klinoptilolit katkının puzolanik aktivitesinin analsime göre daha yüksek oluşundan ve numunelerin kürlenme süresine bağlı ilave bağlayıcıların meydana gelmesine bağlı bir artış olduğu düşünülmektedir (Uzal ve ark., 2010).

Çalışmadaki hafif hamur plaka numunelerin kuru yoğunluklarına göre basınç dayanımlarının tahminine yönelik bağıntılar  $x$ ; kuru yoğunlukları ve  $y$ ; basınç dayanımlarını göstermek üzere analsim ve klinoptilolit için sırasıyla;

$$y = 0.0081x - 1.322 \quad (R^2 = 0.9661) \quad (5.1)$$

$$y = 0.005x - 0.061 \quad (R^2 = 0.7735) \quad (5.2)$$

şeklindedir.

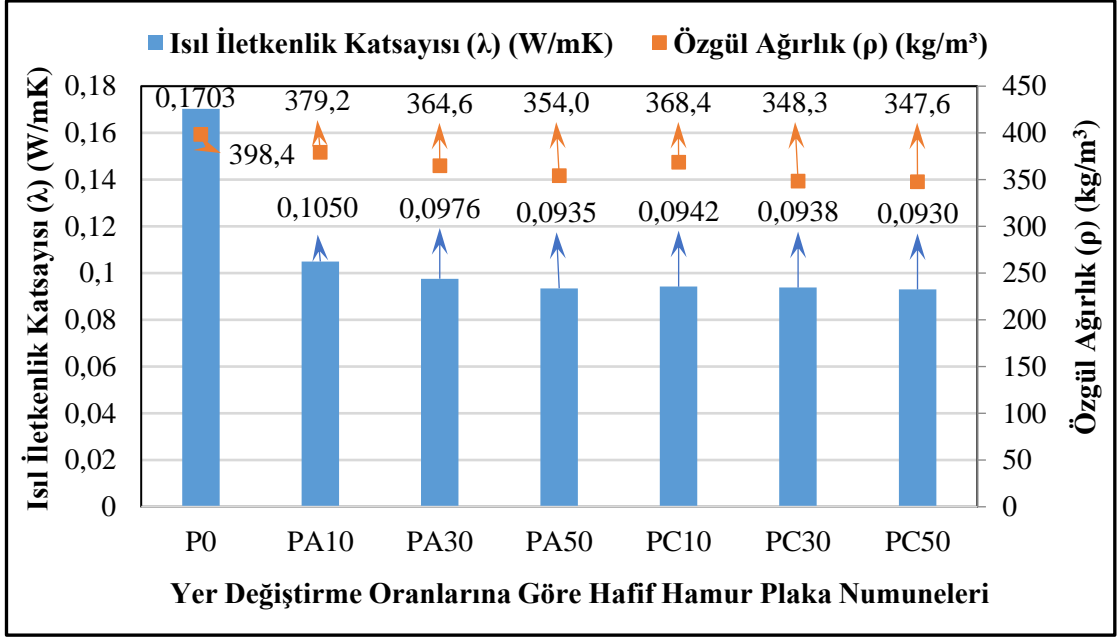
### 5.2.3 Hafif Hamur Plaka Numunelerinin Termal (Isıl) Performansları

DeneySEL çalışmalarda Portland çimentosunun doğal zeolit klinoptilolit ve analsim ile %0, %10, %30, %50 oranlarında yer değiştirilmesi ve köpük ilavesiyle üretilen hafif hamur plaka numunelerinin termal (ısı) performanslarına ilişkin bulgular Çizelge 5.8'de verilmiştir. Ayrıca hafif hamur plaka numunelerinin ısı iletkenlik-özgül ağırlık değişim grafikleri Şekil 5.8'de ve özgül ısı-özgül ağırlık değişim grafikleri ise Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

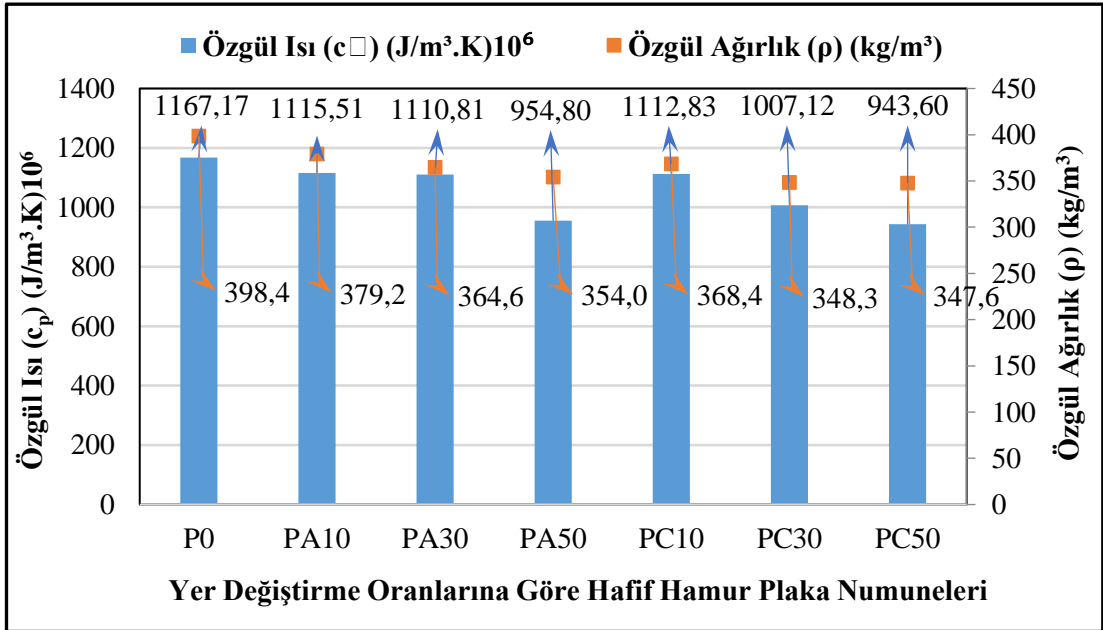
**Çizelge 5.9** Hafif Hamur Plaka Numunelerin Termal Performans Değerleri

Hafif Hamur Plaka Numuneleri	Özgül Ağırlık ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	Isıl İletkenlik ( $k$ ) ( $\text{W/mK}$ )	Özgül Isı ( $c_p$ ) ( $\text{J/kg.K}$ )	Isı Kapasitesi $C \cdot 10^{-6}$ ( $\text{J/m}^3.\text{K}$ )	Isıl Yayımlama Katsayısı ( $\alpha$ ) ( $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ )
P0	398.4	0.1703	1167.17	0.465	0.366
PA10	379.2	0.1050	1115.51	0.423	0.248
PA30	364.6	0.0976	1110.81	0.405	0.241
PA50	354.0	0.0935	954.80	0.338	0.277
PC10	368.4	0.0942	1112.83	0.410	0.230
PC30	348.3	0.0938	1007.12	0.351	0.267
PC50	347.6	0.0930	943.60	0.348	0.283





Şekil 5.9 Hafif Hamur Plaka Numunelerin Isıl İletkenlik Katsayı-Özgül Ağırlıkları



Şekil 5.10 Hafif Hamur Plaka Numunelerin Özgül Isı-Özgül Ağırlıkları

Hafif hamur plaka numuneler için ısı iletkenlik ( $k$ ) değeri, analsim yer değiştirmeli numunelerde klinoptilolit yer değiştirmeli numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Geleneksel hafif hamur plaka numuneleri (P0) ile analsim (PA10, PA30, PA50) - klinoptilolit (PC10, PC30, PC50) katkılı hafif hamur plaka numunelerin ısı iletkenlikleri karşılaştırıldığında görülmektedir ki; zeolit katkılı (PA10, PA30, PA50, PC10, PC30, PC50) deney serisi ısı iletkenlikleri, P0 deney

serisi ısı iletkenliklerinden sırasıyla %38.34, %42.69, %45.10, %44.69, %44.92, %45.39 daha küçüktür. Yer değiştirme oranları arttıkça ısı iletkenlik (k) değerleri azalmaktadır.

Analsim katkı hafif hamur plaka numunelerin özgül ısı ( $c_p$ ) değerleri, klinoptilolit katkı olanlarınkine göre sırasıyla %0.24, %10.30, %1.19 daha yüksektir.

Numunelerin ısı yayınım katsayılarındaki değişim eğilimlerinde %50 yer değiştirmeli olanlarda çok az bir farkla artış görölmektedir. Bu uyumsuzluğun nedenin numunelerdeki köpük fazının düzensiz dağılımına bağlı olduğu düşünölmektedir.

Numunelerin ısı yayınım katsayılarındaki değişim eğilimlerinde %50 yer değiştirmeli olanlarda çok az bir farkla artış görölmektedir. Bu uyumsuzluğun nedenin numunelerdeki köpük fazının düzensiz dağılımına bağlı olduğu düşünölmektedir.

Özetle; hafif hamur plaka numunelerde her iki zeolit için de yer değiştirme miktarı arttıkça ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı kapasitesi değerleri azalmıştır. Analsim yer değiştirmeli hafif hamur plaka numunelerin ısı iletkenlik, ısı yayınım katsayısı, özgül ısı ve ısı kapasitesi değerleri, klinoptilolit yer değiştirmeli numunelere göre yüksektir.

### **5.3 Hafif Harç Plaka Numunelerine Ait Bulgular ve Tartışma**

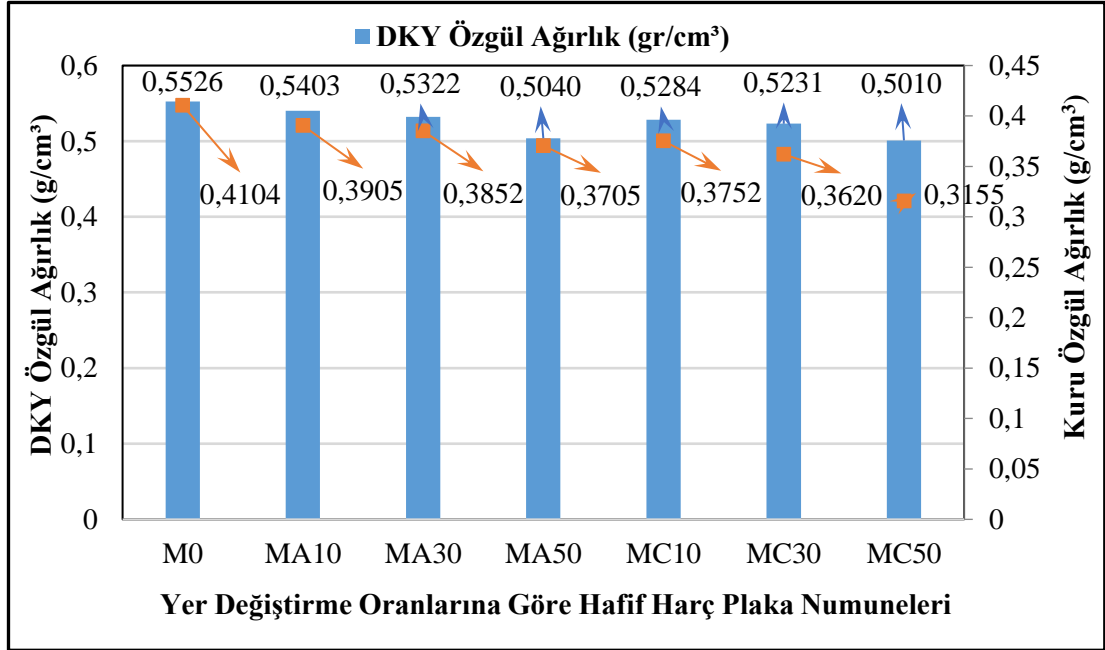
Hafif harç plaka numunelerine ait bazı bulgular ve bunların tartışmaları aşağıda verilmektedir.

#### **5.3.1 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık, Su Emme ve Mini Slump Değerleri**

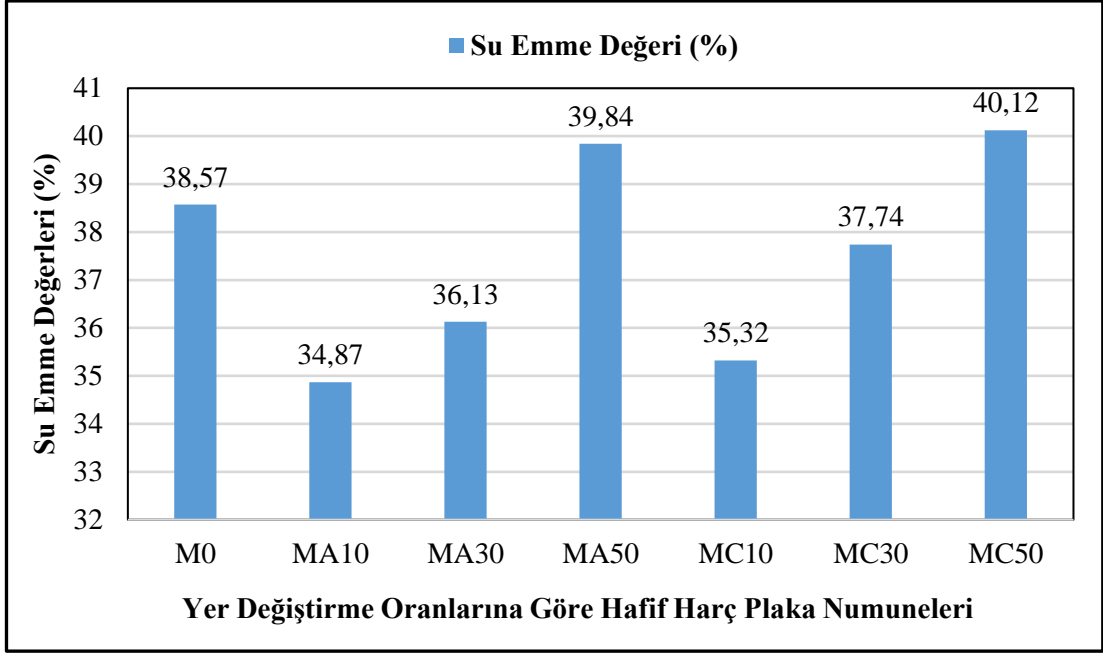
Deneysel çalışmalarda Portland çimentosunun doğal zeolit klinoptilolit ve analsim ile %0, %10, %30, %50 oranlarında yer değiştirilmesi, CEN kumu ve köpük ilavesiyle üretilen hafif harç numunelerinin doğgun kuru yoğunluk (DKY), kuru yoğunluk, su emme değerleri ve mini slump deney sonuçları Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.11'de verilmiş olup ayrıca belirtilen verilerin değişim grafikleri Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.10** Hafif Harç Plaka Numunelerinin Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri

Hafif Harç Plaka Numuneleri	Özgül Ağırlıkları (g/cm <sup>3</sup> ) (28 Günlük)		Su Emme (%)
	DKY	Kuru	
M0	0.5526	0.4104	38.57
MA10	0.5403	0.3905	34.87
MA30	0.5322	0.3852	36.13
MA50	0.5040	0.3705	39.84
MC10	0.5284	0.3752	35.32
MC30	0.5231	0.3620	37.74
MC50	0.5010	0.3155	40.12



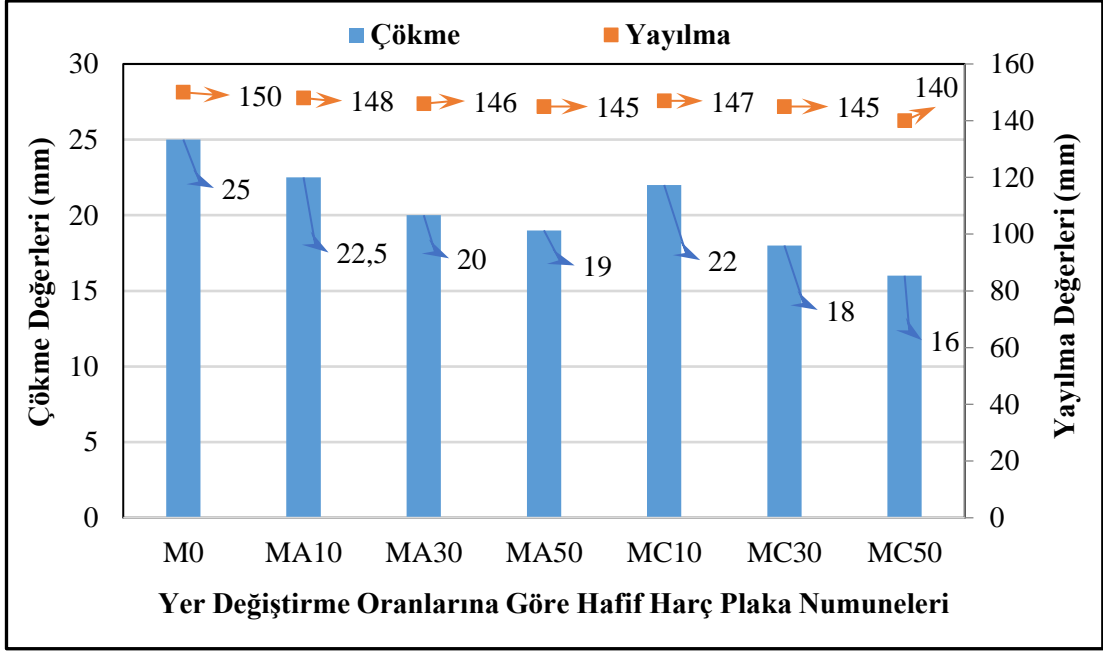
**Şekil 5.11** Hafif Harç Plaka Numunelerinin DKY ve Kuru Özgül Ağırlıkları



Şekil 5.12 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Su Emme Değeri

Çizelge 5.11 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Mini Slump Deney Sonuçları

Hafif Harç Plaka Numuneleri	Çökme (mm)	Yayılma (mm)
M0	25	150
MA10	22.5	148
MA30	20	146
MA50	19	145
MC10	22	147
MC30	18	145
MC50	16	140



**Şekil 5.13** Hafif Harç Plaka Numunelerinin Mini Slump Deney Sonuçları Değişimleri

Çizelge 5.10’da verilen hafif harç plakaların özgül ağırlıkları incelendiğinde, analsim ve klinoptilolit mineral katkıları için yer değiştirme oranlarına göre benzer değişim karakteristiği gözlenmektedir.

Geleneksel hafif harç plaka numuneleri ile analsim yer değiştirmeli harçların (M0, MA10, MA30, MA50) DKY özgül ağırlıkları sırasıyla %2.28, %3.83, %9.64 ve kuru özgül ağırlıkları %5.10, %6.54, %10.77 azalmıştır.

Geleneksel hafif harç plaka numuneleri ile klinoptilolit yer değiştirmeli harçların (M0, MC10, MC30, MC50) DKY özgül ağırlıkları sırasıyla %4.58, %5.64, %10.30 ve kuru özgül ağırlıkları %9.38, %13.37, %30.08 azalmıştır.

Harç numunelerdeki bu azalma eğilimlerinin nedeni analsim ve klinoptilolit katkıların özgül ağırlarının Portland çimentosunun özgül ağırlığına göre daha düşük olmasıdır (Çizelge 5.2).

Geleneksel hafif harç plaka numuneleri ile analsim yer değiştirmeli harçların (M0, MA10, MA30, MA50) su emme değerleri sırasıyla %10.61 %6.75 azalmıştır fakat MA50 deney serisine ait numuneleri M0’a göre %3.19 artmıştır.

Geleneksel hafif harç plaka numuneleri ile klinoptilolit yer değiştirmeli harçların (M0, MC10, MC30, MC50) su emme değerleri sırasıyla %9.20, %2.20 azalmıştır fakat MC50 deney serisine ait numuneleri M0’a göre %3.86 artmıştır.

Deney sonuçlarına göre %50 yer değiştirme oranında referans numunelerinden su emme değerlerinin bir miktar yüksek olmasının nedeni, her iki zeolit katkı sayesinde çimento hamurunda daha yoğun bir ortamın meydana gelmesidir.

Hafif harç plaka numunelerde mini slump deney sonuçları değerlendirildiğinde, analsim katkılı numunelerin çökme ve yayılma değerleri klinoptilolit katkılı numunelerinkinden bir miktar daha düşüktür. Bu durum her iki zeolit inceliklerine bağlı olarak oluşmaktadır. Diğer taraftan, her iki zeolit katkılı hamur numuneleri çökme ve yayılma değerleri geleneksel Portland çimentolu hamur numunelerinkinden daima düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, analsim ve klinoptilolitin Blain incelik değerlerinin Portland çimentosununkinden daha yüksek olmasıdır.

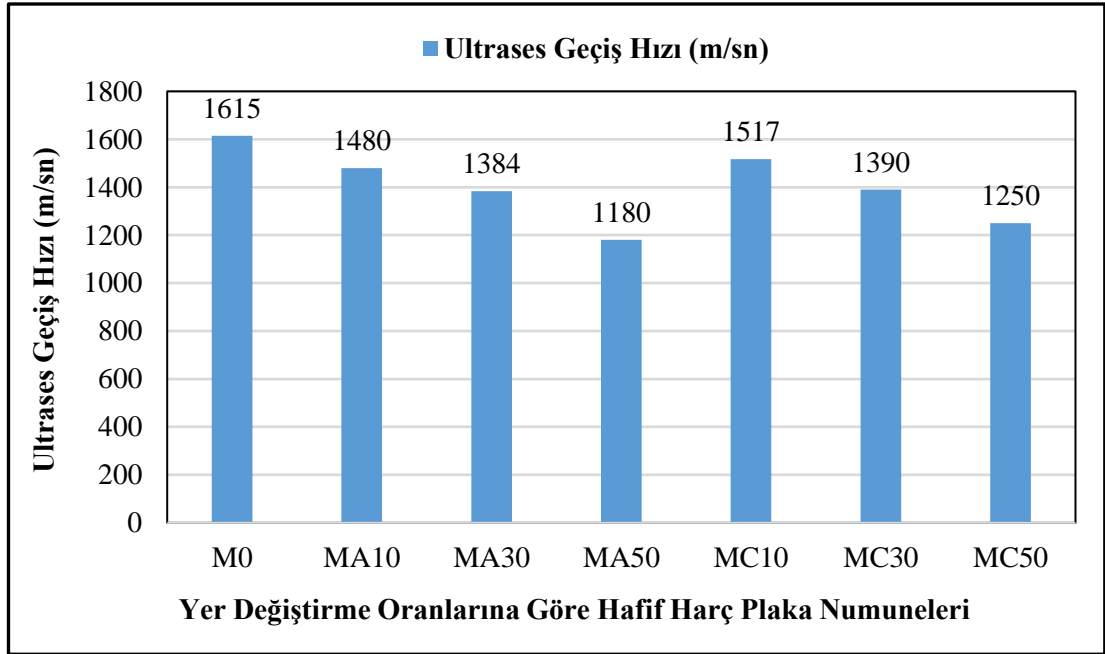
Yukarıda verilen çizelge ve grafikler göz önüne alındığında, hamur numuneler harç numunelere göre, daha az su emme değerlerine sahiptirler. Katkı yer değiştirme oranları arttıkça su emme değerleri de artmaktadır. Bu değişimlerin nedeni, mineral (zeolit) katkılar puzolanik reaksiyon yapabilmek için karışımda yeterince  $\text{Ca(OH)}_2$  bulamamaktadırlar. Çünkü puzolanik mineral katkının miktarı arttıkça sertleşmiş çimento hamurundaki  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı azalmakta böylece ortamdaki mevcut  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in büyük bir bölümü puzolanik reaksiyon için kullanılmaktadır (Turanlı ve ark., 2005).

### **5.3.2 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Ultrasonik Ses Geçiş Hızları**

DeneySEL çalışmalarda Portland çimentosunun doğal zeolit klinoptilolit ve analsim ile %0, %10, %30, %50 oranlarında yer değiştirilmesi, CEN kumu ve köpük ilavesiyle üretilen hafif harç plaka numunelerinin ultrases geçiş hızları Çizelge 5.12'de ve ultrases geçiş hızlarına ilişkin değişim grafiği Şekil 5.14'te verilmiştir.

**Çizelge 5.12** Hafif Harç Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı

Hafif Harç Plaka Numuneleri	Kuru Yoğunluklar (kg/m <sup>3</sup> )	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Basınç Dayanımı (MPa)
M0	410.4	1615	2.10
MA10	390.5	1480	2.00
MA30	385.2	1384	1.80
MA50	370.5	1180	1.54
MC10	375.2	1517	2.05
MC30	362.0	1390	1.90
MC50	315.5	1250	1.62



**Şekil 5.14** Hafif Harç Plaka Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı Değişim Grafiği

28 günlük kuru yoğunluklara sahip küp numuneler üzerinde uygulanan UPV değerlerinin tespit deney sonuçlarına göre yer değiştirmesiz geleneksel hafif harç plaka numuneleri (M0) UPV değerleri analsim ve klinoptilolit katkı yer değiştirmeli numunelerinkinden (MA10, MA30, MA50, MC10, MC30, MC50) çok az bir farkla sırasıyla %9.12, %16.64, %36.86, %6.46, %16.19, %29.20 daha büyüktür. Klinoptilolit katkıli numunelerin (MC10, MC30, MC50) UPV değerleri, analsim

katkılı numunelerin (MA10, MA30, MA50) UPV değerlerinden sırasıyla %2.50, %0.43, %5.93 daha büyüktür.

Küp numunelerin basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında yukarıda verilen UPV değerleri için yapılmış tartışmadaki değişim eğilimleri yaklaşık aynıdır. Buna göre tüm hafif harç plaka numuneleri basınç dayanım değerleri 1.54-2.10 MPa arasındadır. Deney sonuçları TS EN 13655’de verilen 1.5 MPa sınır değeri ile uyumludur. Yer değiştirmesiz geleneksel hafif harç plaka numunelerin (M0) basınç dayanımı değerleri analsim ve klinoptilolit yer değiştirmeli numunelerinkinden (MA10, MA30, MA50, MC10, MC30, MC50) çok az bir farkla sırasıyla %5, %16.67, %36.36, %2.44, %10.53, %29.63 büyüktür. Klinoptilolit katkıli harç numunelerin (MC10, MC30, MC50) basınç dayanım değerleri, analsim katkıli numunelerinkinden (MA10, MA30, MA50) sırasıyla %2.50, %5.56, %5.19 daha büyüktür. 28 günlük klinoptilolit katkıli numunelerin basınç dayanımı değerleri analsim katkıli numunelerinkinden çok az bir farkla daha yüksek olmasının nedeni klinoptilolit katkının puzolanik aktivitesinin analsime göre daha yüksek oluşundan ve numunelerin kürlenme süresine bağlı ilave bağlayıcıların meydana gelmesine bağlı bir artış olduğu düşünülmektedir (Uzal ve ark., 2010).

Çalışmadaki hafif harç plaka numunelerin kuru yoğunluklarına göre basınç dayanımlarının tahminine yönelik bağıntılar x; kuru yoğunlukları ve y; basınç dayanımlarını göstermek üzere analsim ve klinoptilolit için sırasıyla;

$$y= 0.0141x-3.616 (R^2=0.8829) \quad (5.3)$$

$$y=0.0053x-0.0147 (R^2=0.9234) \quad (5.4)$$

şeklindedir.

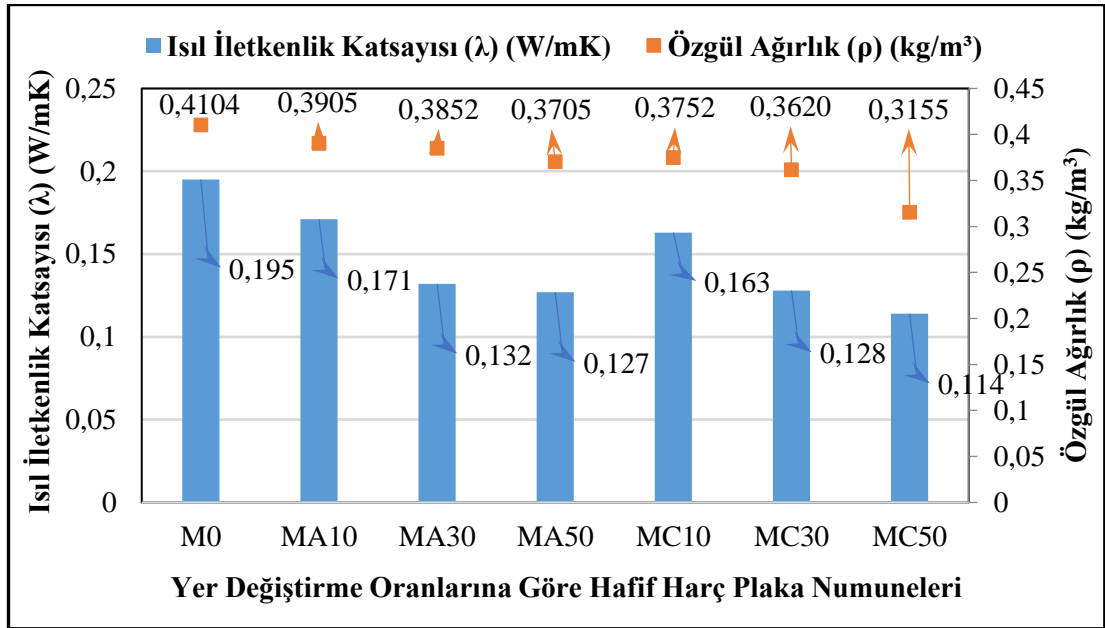
### **5.3.3 Hafif Harç Plaka Numunelerinin Termal (Isıl) Performansları**

Deneyisel çalışmalarda Portland çimentosunun doğal zeolit klinoptilolit ve analsim ile %0, %10, %30, %50 oranlarında yer değiştirilmesi, CEN kumu ve köpük ilavesiyle üretilen hafif harç numunelerinin termal (ısı) performanslarına ilişkin bulgular Çizelge 5.13’te verilmiştir. Ayrıca hafif harç plaka numunelerinin ısı iletkenlik-özgül ağırlık değişim grafikleri Şekil 5.15’ te ve özgül ısı-özgül ağırlık değişim grafikleri ise Şekil 5.16’da gösterilmiştir.

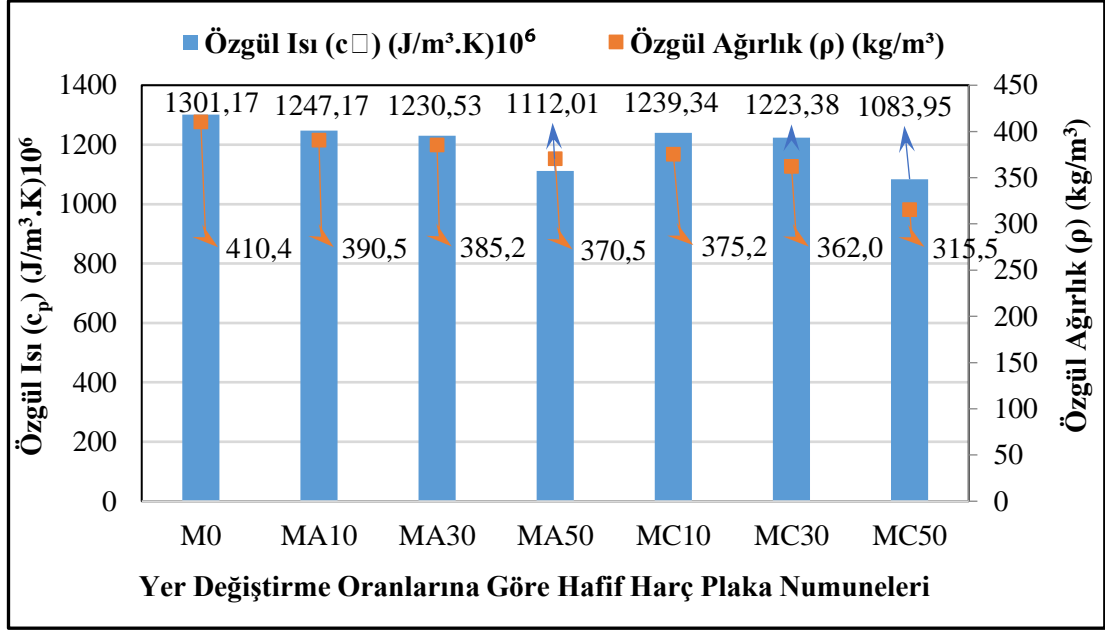


**Çizelge 5.13** Hafif Harç Plaka Numunelerin Termal Performansları

Hafif Harç Plaka Numuneleri	Özgül Ağırlık ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	Isıl İletkenlik ( $k$ ) ( $\text{W/mK}$ )	Özgül Isı ( $C_p$ ) ( $\text{J/kg.K}$ )	Isı Kapasitesi $C \cdot 10^{-6}$ ( $\text{J/m}^3.\text{K}$ )	Isıl Yayımlım Katsayısı ( $\alpha$ ) ( $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ )
M0	410.4	0.195	1301.17	0.534	0.365
MA10	390.5	0.171	1247.17	0.487	0.351
MA30	385.2	0.132	1230.53	0.474	0.278
MA50	370.5	0.127	1112.01	0.412	0.308
MC10	375.2	0.163	1239.34	0.465	0.350
MC30	362.0	0.128	1223.38	0.443	0.289
MC50	315.5	0.114	1083.95	0.342	0.333



**Şekil 5.15** Hafif Harç Plaka Numunelerin Isıl İletkenlik-Özgül Ağırlıkları



**Şekil 5.16** Hafif Harç Plaka Numunelerin Özgül Isı-Özgül Ağırlıkları

Hafif harç plaka numuneler için ısı iletkenlik ( $k$ ) değeri, analsim yer değiştirmeli numunelerde klinoptilolit yer değiştirmeli numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Geleneksel hafif harç plaka numuneleri (M0) ile analsim (MA10, MA30, MA50) - klinoptilolit (MC10, MC30, MC50) katkılı hafif harç plaka numunelerin ısı iletkenlikleri karşılaştırıldığında görülmektedir ki; zeolit katkılı (MA10, MA30, MA50, MC10, MC30, MC50) deney serisi ısı iletkenlikleri, M0 deney serisi ısı iletkenliklerinden sırasıyla %12.31, %32.31, %34.87, %16.41, %34.36, %41.54 daha küçüktür. Yer değiştirme oranları arttıkça ısı iletkenlik ( $k$ ) değerleri azalmaktadır.

Analsim katkılı hafif harç plaka numunelerin özgül ısı ( $c_p$ ) değerleri, klinoptilolit katkılı olanlarınkine göre sırasıyla %0.63, %0.58, %2.59 daha yüksektir.

Numunelerin ısı yayılım katsayılarındaki değişim eğilimlerinde %50 yer değiştirmeli olanlarda çok az bir farkla artış görülmektedir. Bu uyumsuzluğun nedenin numunelerdeki köpük fazının düzensiz dağılımına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Numunelerin ısı yayılım katsayılarındaki değişim eğilimlerinde %50 yer değiştirmeli olanlarda çok az bir farkla artış görülmektedir. Bu uyumsuzluğun nedenin numunelerdeki köpük fazının düzensiz dağılımına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Özetle; hafif harç plaka numunelerde her iki zeolit için de yer değiştirme miktarı arttıkça ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı kapasitesi değerleri azalmıştır. Analsim yer değiştirmeli hafif harç plaka numunelerin ısı iletkenlik, ısı yayınım katsayısı, özgül ısı ve ısı kapasitesi değerleri, klinoptilolit yer değiştirmeli numunelere göre yüksektir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında, farklı yer değiştirme oranlarına sahip, birbirine alternatif iki farklı zeolit türü (analsim ve klinoptilolit) ve eşit oranda köpük ajanı kullanılarak üretilen hafif hamur ve harç plakalar üzerinde gerçekleştirilen deneysel incelemeye dayanarak bazı sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir.

1. Hem taşıyıcı hem de taşıyıcı olmayan yapı imalatlarında, istenilen kalitede hafif yapı elemanları (duvar panelleri, duvar blokları, çatı elemanları ve prekast beton üniteler) doğal zeolitlerden analsim ve klinoptilolit katkılı çimentolar ve uygun bir köpük ajanı kullanılarak düşük özgül ağırlıklarda yeterli dayanım ve termal performansları ile amaca uygun yer değiştirme yüzdeleri seçilerek kullanılabilir. Bu tasarımlar sayesinde yapı üzerindeki sabit yük azalacak ve bu da çok katlı yapılarda daha ince kesit tasarımlarına imkân sağlayabilecektir.

2. Çalışmada kullanılan doğal zeolitlerden olan analsim ve klinoptilolitin özgül ağırlıklarının Portland çimentosuna göre daha düşük oluşu ve üretimlerde köpük ajanı kullanımı sayesinde elde edilen karışımların DKY ve kuru özgül ağırlıkları azalmıştır.

3. Deneysel çalışmalarda ağırlıkça %0, %10, %30 ve %50 oranlarda zeolit katkılı çimentolu hafif hamur ve harç plakalarda her iki doğal zeolit için yer değiştirme miktarındaki artışla beraber DKY ve kuru özgül ağırlıklarının azaldığı, su emme oranlarının ise arttığı görülmektedir.

4. Her iki doğal zeolit için yer değiştirme miktarları arttığında, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları azalmaktadır. Hamur ve harç plakaların özgül ağırlıkları dikkate alınarak yapılan karşılaştırmada da hem özgül ağırlık hem de UPV ve dayanımlar aynı değişim eğiliminde ve birbirlerini doğrular niteliktedir.

5. Hamur ve harç plakalarda her iki zeolit için de yer değiştirme miktarı arttıkça ısı iletkenlik, özgül ısı, ısı kapasitesi ve ısı yayılım katsayısı değerleri azalmıştır. Analsim yer değiştirmeli hamur ve harç plakaların ısı iletkenlik, özgül ısı ve ısı kapasitesi ve ısı yayılım katsayısı değerleri klinoptilolit yer değiştirmeli plakalara göre daha yüksektir.

6. Çalışmada tasarlanan deney serilerindeki hafif hamur ve harç plakaların ısı iletkenlikleri her iki zeolit katkınının yer değiştirme oranlarındaki her bir artışta önemli

miktarlarda azalmıştır. Bu azalmaların nedeni, köpük ajanın meydana getirdiği hava boşluklarının yanı sıra zeolit katkıli çimentoların Portland çimentosuna göre özgül ağırlıklarındaki azalma ve zeolit katkıların kendi yapısal boşluklarının bir sonucudur. Hafif hamur ve harç plakaların termal iletkenliklerindeki maksimum azalma %50 yer değiştirme oranında analsim ve klinoptilolit katkı için hamur plakalarda sırasıyla %45.10, %45.40 ve harç plakalarda %34.87, %41.54'dür.

7. Hafif hamur plakalarda en yüksek özgül ısı değeri, PA10 deney serisindeki hafif hamur plakalarda gözlenmiştir. Bu seri PO serisi ile karşılaştırıldığında, ısı depolama kabiliyeti yalnızca %4.45 kadar düşüktür. Hafif hamur plakalarda analsim katkının ısı depolama kabiliyeti tüm yer değiştirme oranlarında klinoptilolit katkıya oranla az bir farkla daha iyi performans sergilemektedir.

8. Bu çalışmadaki tüm deney serileri içerisinde (hafif hamur ve harç plaka numuneleri için) en yüksek özgül ısı değeri, MA10 deney serisindeki hafif harç plakalarda gözlenmiştir. Bu seri MO serisi ile karşılaştırıldığında, ısı depolama kabiliyeti yalnızca %4.15 kadar düşüktür. Hafif harç plakalarda analsim katkının ısı depolama kabiliyeti tüm yer değiştirme oranlarında klinoptilolit katkıya oranla az bir farkla daha iyi performans sergilemektedir.

9. Harç plakalarda kullanılan standart kum, harç plakaların özgül ağırlıklarının artışına neden olmuştur. Bu artışa bağlı olarak harç plakaların ısıl iletkenlik, özgül ısı, ısı kapasitesi, UPV değerleri ve basınç dayanımları bir miktar artış meydana gelmiştir.

10. Burada, yukarıda belirlenen tüm sonuçların çalışmada kullanılan doğal zeolitler ve bu deneysel çalışma şartlarında geçerli olduğunu vurgulamak gerekmektedir. Farklı bölgelerden elde edilecek olan zeolit türleri üzerinde daha çok verinin elde edilmesi gereği açıktır. Ayrıca, köpük betonların iç yapısındaki boşluk değişimleri ve bunların köpük betonların fiziksel, mekanik özellikleri üzerindeki etkileri konusunda daha detaylı incelemelerin yapılması gerekmektedir.

Özetle; bu deneysel çalışmanın elde edilen sonuçlarına göre, özellikle enerji etkin yapı tasarımlarında piyasada giderek yaygınlaşmakta olan köpük beton uygulamalarında her iki zeolit katkının da kullanımıyla dayanım ve termal performans aynı anda değerlendirildiğinde %10 yer değiştirme oranına kadar termal performanslarının iyileştirilebileceği görülmektedir. Ancak, bu durum 28 günlük

dayanım değerleri için geçerlidir. Daha uzun kr şartlarında zeolitlerin puzolanik reaksiyonlarına bağlı olarak dayanımların artabileceği literatürdeki zeolitler üzerinde gerçekleştirilmiş çalışmalardan grlmektedir (Bilim, 2011). Diğer taraftan, taşıyıcı olmayan yapı elemanları uygulamalarında daha yüksek yer değiştirme oranlarıyla da imalatların sadece termal performans amaçları düşünülerek gerçekleştirilebileceği çalışma sonuçlarından görülebilmektedir.

## 7. KAYNAKLAR

- Akgün, Y. & Yazıcıoğlu, Ö. (2016). Experimental research on alternative puzzolan analcime to clinoptilolite. *Romanian Journal of Meterials*, 50(4), 502-509.
- Anonim, (2019). World Population Prospects. United Nations, New York.
- Anonim, (2020). Key world energy statistics 2020. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/1b7781df-5c93-492a-acd6-01fc90388b0f/Key\\_World\\_Energy\\_Statistics\\_2020.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/1b7781df-5c93-492a-acd6-01fc90388b0f/Key_World_Energy_Statistics_2020.pdf)-(Erişim tarihi: 06.07.2021).
- Anonim, (2021). Oski 2021 yılı su analiz raporları. <https://www.oski.gov.tr/suanalizraporlari/index.aspx>-(Erişim tarihi: 06.07.2021).
- ASTM C 311. (1994). Standart Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use a Mineral Admixture Portland – Cement Concrete. American Society for Testing Materials (ASTM), Philadelphia, USA.
- ASTM C 430. (2017). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve (ASTM), Philadelphia.
- ASTM C 597. (1998). Standard test method for pulse velocity through concrete. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA.
- ASTM C 618. (1994). Standart specification for coal fly ash and raw or calcined natural puzzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. American Society for Testing Materials (ASTM), Philadelphia, USA.
- Beningfield, N., Gaimster, R. & Griffin, P. (2005). Investigation into the air void characteristics of foamed concrete. Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, July 5, University of Dundee, Scotland, 51–60 pp.
- Breck, DW. (1974). Zeolite Molecular Sieves. Srtucture, Chemistry and Uses, Wiley-İnterscience, New York, USA, 771 pp.
- Beşergil, B. (2018). Zeolit. <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/zeolit-zeolite.html>-(Erişim tarihi: 13.07.2021).
- Bilim, C. (2011). Çimento harçlarında ikame malzemesi olarak zeolite ve silis dumanı kullanımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27 (4), 339-345.
- Clarke, JL. (1993). Structural Lightweight Aggregate Concrete. Blackie Academic & Professional, London, England, 158 pp.
- Çaçur, Y. (2019). Hücresel hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Van.
- Davis, RE., Carlson, RW., Kelly, JW. & Davis, HE. (1935). Properties of cements and concretes containing fly ash. *ACI Journal*, 33(5), 577-612.

- Davraz, M., Kılınçarslan Ş. & Kuru M. (2015). Farklı yoğunluktaki köpük betonların dayanım ve ısı iletkenlik özellikleri. 9. Ulusal beton kongresi, 16-18 Nisan, Ramada Plaza, Antalya.
- Demirboğa, R. & Gül, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 723-727.
- Dincer, I. & Rosen, M. (2002). Thermal energy storage: Systems and Applications. John Wiley & Sons, New York, USA, 237pp.
- DIN 51046, (1976). Testing of ceramic materials; determination of thermal conductivity up to 1600 °C according to the hot wire method, thermal conductivity up to  $2 \text{ W} \times \text{K}^{-1} \times \text{m}^{-1}$ . Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin, Germany.
- Erdoğan, TY. (1991). Strength properties of low-lime and high-lime fly ash concretes. 9. International Ash Use Symposium, 1 January, Washington DC, United States.
- Erdoğan, TY. (1995). Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 29 Kasım, Ankara.
- Erdoğan, TY. (2003). Beton. METU Press, Ankara, 760s.
- Erdoğan, TY. (2004). Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri. Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 256s.
- Erdoğan, ST. & Erdoğan TY. (2007). Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 12-13 Nisan, Milli Kütüphane Konferans Salonu, Ankara.
- Gökçe, HS. (2010). Hafif beton üretiminde ham ve genişletirilmiş perlitin kullanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.
- Hauer, A. (2002). Thermal energy storage with zeolite for heating and cooling application. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Through Phase Change Materials and Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects. 3rd Workshop, 1-2 October, Tokyo, Japan.
- Hilal, AA., Thom, NH. & Dawson, AR. (2015b). On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives. *Construction and Building Materials*, 85, 157-164.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T. & Chindaprasirt P. (2011). Cellular lightweight concrete containing puzzolan materials. *Procedia Engineering*, 14, 1157-1164.
- Jones, MR. & McCarthy A. (2005a). Behavior and assessment of foamed concrete for construction application. Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction, July 5, University of Dundee, Scotland, 61-88 pp.
- Karakurt, C., Kurama H. & Topçu, İB. (2010). Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cement & Concrete Composites*, 32, 1-8.




- Karatiç, E. (2008). Uçucu kül ve zeolitin kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Keçeci, A. (2018). Kendiliğinden yerleşen betonlarda silis dumanı kullanımının beton basınç dayanımına ve aderansa etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Khalaf, A., Nooman, MT., Kohail, M. & Nasr El-Sayed AR. (2018). The effect of zeolite on the properties of the lightweight concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9(6), 303-308.
- Khan, MI. (2002). Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*, 37(6), 607–614 pp.
- Kılınçarslan, Ş., Davraz M. & Işıldar, N. (2019). Genleştirilmiş polistrenin uçucu kül içeren köpük beton özellikleri üzerine etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 224-231.
- Konuk, D. (2013). Bir zeolit-tabakalı çift hidroksit kompozitinin hazırlanması ve sulu amonyum pentaborat çözeltilerinden anyon ve katyonların absorpsiyonunda kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Ankara.
- Kumbasar, I. (1977). Silikat mineralleri. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını, No: 1098, İstanbul, 181s.
- Kuzielova, E., Pach, L. & Palou, M. (2016). Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties. *Construction and Building Materials*, 125, 998-1004.
- Mehta, PK. (1986). Condensed silica fume cement replacing materials. Surrey University Press, Guildford, United Kingdom, 136-137 pp.
- Moosavi, L., Mahyuddin, N., Ghafar, NA. & Ismail, MA. (2014). Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 654–670 pp.
- Mortureux, B., Hornain, H., Gautier, E. & Regourd, M. (1980). Comparasion of the reactivity of the different puzzolans. Proceeding the 7 th International Congress on Chemistry of Cements, Paris, France, 110-115pp.
- Ören, OH. (2017). Granüle yüksek fırın cürufunun köpük beton özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın.
- Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S. & Elayaperumal, A. (2012). Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2394-2433.
- Price, WH. (1975). Puzzolans a review. *Journal of the American Concrete Institute*, 82(4), 225-234.

- Ramamurty, K., Nambiar, EK. & Ranjani, GIS. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388-396 pp.
- Swamy, RN. (1986). Cement replacement materials. *Blackie & Son Ltd.*, 1986, Londra, United Kingdom, 259s.
- Şahin, MB. (2014). Zeolitler. *Maden Tetkik Arama Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 17, 53-60.
- Şimşek, O. (2012). Beton ve beton teknolojisi. Seçkin Yayıncılık, 4. Baskı, Ankara, 287s.
- Tarun, RN., Malhotra, VM. & Popovics, JS. (2004). Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC Press, Second Edition, London, England, 384 pp.
- Tokyay, M. & Erdoğdu, K. (1997). Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar. Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları, Ankara, 9-11 pp.
- TS 25. (2008). Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 196-1. (2009). Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 197-1. (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 450-1. (2013). Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 993-15. (2006). Refrakter ürünler-Yoğun ve şekillendirilmiş-Deney metotları-Bölüm 15: Kızgın tel (paralel) metodu ile termal iletkenlik tayini. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 1008. (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 1097-6. (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 12504-4. (2012). Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN 13655. (2015). Kâgir birimler - Özellikler - Köpükbeton kâgir birimler. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN ISO 6946. (2017). Yapı bileşenleri ve yapı elemanları - Isıl direnç ve ısı geçirgenlik - Hesaplama yöntemi. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.
- TS EN ISO 8990. (2002). Isı yalıtımı- Kararlı durum ısı iletim özelliklerinin tayini-Kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu. Türk Standardları Enstitüsü (TSE), Ankara.

- Turanlı, L., Uzal, B. & Bektaş, F. (2005). Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. *Cement and Concrete Research*, 35, 1106-1111 pp.
- Tuzlak, F. (2017). Taze beton reolojisinin köpük beton özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Utlu, Z., Aydın, D. & Kıncay, O. (2013). Yeşil bina uygulamalarında gizli ısı depolama sistemlerinin kullanılabilirliğinin araştırılması. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, MMO Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi, İzmir.
- Urhan, S. (1993). Hafif ve çok hafif betonların karakteristik özellikleri ve teknik kapasiteleri. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, (369), 34-40.
- Uzal, B., Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu MC. & Çulfaz, A. (2010). Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 40, 398-404.
- Ün, H. (2007). Yapı malzemeleri ders notları. Denizli, [https://doczz.biz.tr/doc/116418/yapi\\_malzemesi\\_2-baglayici-kirec-dogal\\_puzolan-](https://doczz.biz.tr/doc/116418/yapi_malzemesi_2-baglayici-kirec-dogal_puzolan-)(Erişim tarihi: 05.07.2021).
- Yazıcıoğlu, Ö. (2016). Çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilir üretimlerinde doğal zeolite (analsim)' in puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu.
- Yılmaz, T. (2018). Analsim ve klinoptilolit ikamesi ile üretilmiş çimento harç ve betonun ısı depolamada kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, Ordu.
- Zhao, X., Lim, SK., Tan, CS., Li, B., Ling, TC., Huang, R. & Wang, Q. (2015). Properties of foamed mortar prepared with granulated blast-furnace slag. *Materials*, 8, 462-473.
- Zhuhua, P., Hengzhi, L. & Weiqing, L. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 256-261.

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ali Rıza YAMAK
Doğum Yeri	Torul/GÜMÜŞHANE
Doğum Tarihi	03.11.1993
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0530 183 60 48
E-Posta Adresi	a.riza.yamak@hotmail.com
	
<b>Lisans</b>	
Üniversite	Anadolu Üniversitesi
Fakülte	Açıköğretim Fakültesi
Bölümü	Kamu Yönetimi
Mezuniyet Yılı	25.01.2016
<b>Lisans</b>	
Üniversite	Kırıkkale Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Tarihi	26.06.2018
<b>Yüksek Lisans</b>	
Üniversite	Ordu Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı
Mezuniyet Tarihi	15.09.2021