

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DİYATOMİT KULLANIMININ GEOPOLİMER HARÇLARIN  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİKİRİYE AKYÜZ

TEZ DANIŐMANI

PROF. DR. CENK KARAKURT

BİLECİK, 2026

10780460

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DİYATOMİT KULLANIMININ GEOPOLİMER HARÇLARIN  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİKRİYE AKYÜZ

TEZ DANIŐMANI  
PROF. DR. CENK KARAKURT

BİLECİK, 2026

10780460

## BEYAN

Diyatomit Kullanımının Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Bu çalışmanın,<br>Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda;<br>projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise<br>ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir. |                            |
| <b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b> |
| <b>Destek alındı ise;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                            |
| <b>Destekleyen kurum;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                            |
| <b>Desteğin Türü</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Proje Numarası</b>      |
| <b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                |                            |
| <b>2- TÜBİTAK</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                            |
| <b>Diğer;.....</b><br>.....                                                                                                                                                                                                                                                                               |                            |
| <b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                          |                            |
| <b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       | ...../.....<br>.....       |

**Öğrenci Adı ve Soyadı**

**Fikriye Akyüz**

**Tarih**

.....

**İmza**

.....

## ÖN SÖZ

Uzun ve yorucu bir sürecin sonunda tamamladığım bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında emeği geçen birçok kişiye teşekkür etmek isterim. Öncelikle, çalışmalarımın yürütülmesinde değerli vaktini bana ayıran, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Cenk KARAKURT' a tüm katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarda yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Ahmet Ferdi ŞENOL' a teşekkür ederim. Onun desteğiyle zorlu süreçler çok daha kolay hale gelmiştir.

Bu çalışmanın başından sonuna kadar her aşamada yanımda olan ve her türlü desteğini cömertçe sunan değerli arkadaşım Pervin GENCOĞLU' na katkılarından dolayı minnettarım.

Sevgiyle yanımda olup bana cesaret veren ve sabırlarıyla destek olan canım ailemin her bir ferdine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çok kıymetli arkadaşlarıma çalışma sürecim boyunca göstermiş oldukları destek için teşekkür ederim.

Tümünün desteği olmasaydı, bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Bu tez, yalnızca bir akademik çalışma değil, aynı zamanda sabır, emek ve azmin bir ürünü olarak hayatımda özel bir yer edinmiştir.

**Fikriye AKYÜZ**

**2026**

## ÖZET

### DİYATOMİT KULLANIMININ GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Günümüzde yapı sektöründe hem çevresel sürdürülebilirlik hem de yapısal verimlilik arayışı giderek önem kazanmaktadır. Bu bağlamda geopolimerler, endüstriyel atıkların ve doğal hammaddelerin çimento yerine bağlayıcı olarak kullanımı sayesinde hem çevresel fayda sağlamakta hem de çimento üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Hafif kompozit ise, daha düşük yoğunluğu sayesinde yapıların ölü yükünü azaltarak deprem güvenliği açısından avantaj sağlamasının yanı sıra, yüksek ısı ve ses yalıtımı özellikleri ile enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Geopolimer ve hafif kompozitin sunduğu bu çevresel ve teknik faydalar, onları günümüz inşaat mühendisliği uygulamalarında stratejik öneme sahip yenilikçi malzemeler haline getirmektedir.

Bu çalışmada, hafif ve çevre dostu yapı malzemelerinin geliştirilmesi amacıyla, doğal kökenli bir mineral olan diyatomitin geopolimer harçlarda agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Afyonkarahisar ve Ankara Polatlı bölgesinden temin edilen diyatomitler, CEN standart kum ile karşılaştırılarak granülometri uyumu sağlanmış ve özgül ağırlığı piknometre deneyiyle belirlenmiştir. Diyatomitin düşük yoğunluğu, üretilen harçların birim hacim ağırlığını azaltarak hafif yapı malzemesi elde etme potansiyelini ortaya koymuştur. Farklı oranlarda diyatomit ikamesi ile hazırlanan geopolimer harç numuneleri işlenebilirlik deneyine tabi tutularak ikame oranları netleştirilmiştir. CEN standart kum ile üretilen kontrol numunesinin (K) ardından, Afyon Diyatomit (AD) ve Polatlı Diyatomit (PD) % 10,%20 ve %30 seviyelerinde standart kum yerine agrega olarak kullanılarak harç serileri hazırlanmıştır. Deney numunelerinin üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk ve ultra ses geçiş hızı ve ısı iletkenlik deneyleri yapılarak mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin yüzey morfolojisi FE-SEM ile, elementel bileşimi EDS ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, diyatomit katkısının geopolimer harçlarda hem hafiflik hem de ısı yalıtımı açısından avantaj sağladığını, ancak ikame oranına bağlı olarak mekanik dayanımlarda belirli düzeyde azalmalar meydana geldiğini göstermiştir. Bu bağlamda, diyatomitin uygun oranlarda kullanımıyla sürdürülebilir, hafif ve ısı yalıtım özelliği yüksek yapı malzemeleri üretilebileceği ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer harç, Diyatomit, Doğal agrega, Yüksek fırın cürufu, Hafif kompozit

## ABSTRACT

### EFFECT OF DIATOMITE USE ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS

In today's, the search for both environmental sustainability and structural efficiency in the construction sector is gaining increasing importance. In this context, geopolymers provide environmental benefits and have the potential to reduce carbon emissions arising from cement production by enabling the use of industrial wastes and natural raw materials as binders instead of cement. Lightweight composite, on the other hand, not only offers advantages in terms of seismic safety by reducing the dead load of structures due to its lower density, but also contributes to energy efficiency with its high thermal and acoustic insulation properties. The environmental and technical benefits offered by geopolymers and lightweight composite make them innovative materials of strategic importance in today's civil engineering applications. In this study, in order to develop lightweight and environmentally friendly construction materials, the usability of diatomite, a natural-origin mineral, as an aggregate in geopolymer mortars was investigated. Diatomites obtained from the Afyonkarahisar and Ankara Polatlı regions were compared with CEN standard sand, granulometric compatibility was ensured, and their specific gravity was determined by the pycnometer test. The low density of diatomite revealed its potential to reduce the unit volume weight of the produced mortars and to obtain lightweight construction materials. Geopolymer mortar specimens prepared with different diatomite replacement ratios were subjected to workability tests, and the replacement ratios were clarified. Following the control specimen (K) produced with CEN standard sand, mortar series were prepared by using Afyon Diatomite (AD) and Polatlı Diatomite (PD) as aggregates instead of standard sand at levels of 10%, 20%, and 30%. Compressive strength, flexural strength, density, ultrasonic pulse velocity, and thermal conductivity tests were conducted on the test specimens, and their mechanical and physical properties were investigated. In addition, the surface morphology of the specimens was examined by FE-SEM, and their elemental composition was determined by EDS. The obtained results showed that diatomite addition provides advantages in geopolymer mortars in terms of both lightweight characteristics and thermal insulation; however, depending on the replacement ratio, certain reductions in mechanical strength occurred. In this context, it was demonstrated that sustainable, lightweight, and thermally insulating construction materials can be produced by using diatomite at appropriate ratios.

**Keywords:** Geopolymer mortar, Diatomite, Natural aggregate, Blast furnace slag, Lightweight concrete,

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                    | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ.....                                                                         | i     |
| ÖZET.....                                                                          | ii    |
| ABSTRACT.....                                                                      | iii   |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                   | v     |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                              | vii   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                              | viii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....                                               | x     |
| 1.GİRİŞ.....                                                                       | 1     |
| 1.1. Genel.....                                                                    | 1     |
| 1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi.....                                                | 3     |
| 1.3. Çalışmanın Kapsamı.....                                                       | 4     |
| 1.4. Diyatomit ve Geopolimer Harçlar İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar ..... | 4     |
| 2. MALZEMELER VE YÖNTEM.....                                                       | 15    |
| 2.1. Malzemeler .....                                                              | 15    |
| 2.1.1. Diyatomit .....                                                             | 15    |
| 2.1.2. CEN Standart Kum .....                                                      | 19    |
| 2.1.3. Yüksek Fırın Cürufu .....                                                   | 20    |
| 2.1.4. Alkali Aktivatörler .....                                                   | 22    |
| 2.2. Yöntemler .....                                                               | 23    |
| 2.2.1. Geopolimer Harç Serilerinin Üretimi .....                                   | 23    |
| 2.2.2. Yayılma Tablası Deneyi .....                                                | 25    |
| 2.2.3. Birim Hacim Ağırlık Deneyi .....                                            | 26    |
| 2.2.4. Eğilme Dayanımı Deneyi .....                                                | 26    |
| 2.2.5. Basınç Dayanımı Deneyi .....                                                | 28    |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi .....        | 29        |
| 2.2.7. Isıl İletkenlik Deneyi .....            | 31        |
| 2.2.8. Mikro Yapı Analizi .....                | 31        |
| <b>3.DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLAR</b> .....       | <b>33</b> |
| 3.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları .....      | 33        |
| 3.2. Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları ..... | 34        |
| 3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları ..... | 35        |
| 3.4. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları .....     | 37        |
| 3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....      | 39        |
| 3.6. Isıl İletkenlik Deney Sonuçları .....     | 41        |
| 3.7. Mikro Yapı Analiz Sonuçları .....         | 43        |
| <b>4.SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....               | <b>52</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b> .....                          | <b>55</b> |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                  | Sayfa     |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Polatlı ve Afyon Diyatomit XRF Analizi.....    | <b>18</b> |
| <b>Tablo 2.2.</b> CEN Standart Kumunun Granülometrisi .....      | <b>20</b> |
| <b>Tablo 2.3.</b> GYFC Kimyasal Kompozisyonu .....               | <b>22</b> |
| <b>Tablo 2.4.</b> Geopolimer Harç Serileri Karışım Tablosu ..... | <b>25</b> |
| <b>Tablo 3.1.</b> EDS Element Değerleri .....                    | <b>49</b> |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Diyatomit .....                                                      | 16    |
| Şekil 2.2. Afyonkarahisar Diyatomit Yatağı .....                                | 17    |
| Şekil 2.3. Diyatomit Agregada Tane Dağılım Eğrisi .....                         | 19    |
| Şekil 2.4. Laboratuvarında Agregada Hazırlık .....                              | 19    |
| Şekil 2.5. Laboratuvarında Harç Serisi Üretimi .....                            | 24    |
| Şekil 2.6. Numunelerin Kür Süreci .....                                         | 25    |
| Şekil 2.7. Yayılma Tablası Deneyi .....                                         | 26    |
| Şekil 2.8. Beton Basınç-Eğilme Test Cihazı .....                                | 27    |
| Şekil 2.9. Eğilme Dayanımı Deneyi .....                                         | 28    |
| Şekil 2.10. Basınç Dayanımı Deneyi .....                                        | 29    |
| Şekil 2.11. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi .....                                    | 30    |
| Şekil 2.12. TCi Ctherm Isıl İletkenlik Cihazı .....                             | 31    |
| Şekil 2.13. ESOGÜ ARUM FE-SEM Cihazı .....                                      | 32    |
| Şekil 3.1. Geopolimer Serilerin Yayılma Değerleri .....                         | 33    |
| Şekil 3.2. Geopolimer Harç Serileri Birim Hacim Ağırlık Değerleri .....         | 34    |
| Şekil 3.3. Geopolimer Harç Serileri Ultrases Geçiş Hızı Değerleri .....         | 36    |
| Şekil 3.4. Geopolimer Harç Serileri Eğilme Dayanımı Değerleri .....             | 37    |
| Şekil 3.5. Geopolimer Harç Serileri Basınç Dayanımı Değerleri .....             | 39    |
| Şekil 3.6. Geopolimer Harç Serileri Ortalama Isı İletkenlik Değerleri .....     | 42    |
| Şekil 3.7. Geopolimer Harç Serileri Isıl Yayılım Değerleri .....                | 42    |
| Şekil 3.8. Isıl Yayılım İle Isıl İletkenlik Arasındaki İlişki .....             | 43    |
| Şekil 3.9. K Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri .....     | 44    |
| Şekil 3.10. AD10 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri ..... | 45    |
| Şekil 3.11. AD20 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri ..... | 46    |

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 3.12.</b> AD30 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri ..... | <b>47</b> |
| <b>Şekil 3.13.</b> PD10 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri ..... | <b>47</b> |
| <b>Şekil 3.14.</b> PD20 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri ..... | <b>48</b> |
| <b>Şekil 3.15.</b> PD30 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri ..... | <b>49</b> |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

- ACI** : American Concrete Institute  
**AD** : Afyon Diyatomit  
**AK** : Alkali Aktivasyon  
**EN** : European Norm  
**GYFC** : Granüle Yüksek Fırın Cürufu  
**K** : Kontrol Serisi  
**N-A-S-H** : Sodyum Alüminosilikat Hidrat Jeli  
**PD** : Polatlı Diyatomit  
**TS** : Türk Standardı  
**UPV** : Ultrasonic Pulse Velocity (Ultrases Geçiş Hızı)  
**XRF** : X-Işını Floresans
- H<sub>2</sub>O** : Su  
**NaOH** : Sodyum Hidroksit  
**Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>** : Sodyum Silikat  
**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** : Sodyum Karbonat  
**Ca(OH)<sub>2</sub>** : Kalsiyum Hidroksit
- N-A-S-H** : Sodyum-Alüminyum-Silikat-Hidrat  
**C-A-S-H** : Kalsiyum -Alüminyum-Silikat-Hidrat  
**CaO** : Kalsiyum Oksit  
**SiO<sub>2</sub>** : Silisyum Dioksit  
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Alüminyum Oksit  
**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Demir(III) Oksit  
**FeO** : Demir(II) Oksit  
**MgO** : Magnezyum Oksit  
**K<sub>2</sub>O** : Potasyum Oksit  
**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** : Fosfor Pentaoksit  
**SO<sub>3</sub>** : Kükürt Trioksit  
**Na<sub>2</sub>O** : Sodyum Oksit  
**MnO** : Manganez Oksit  
**S** : Kükürt
- ρ** : Birim hacim ağırlık

**g** : Gram

**kg** : Kilogram

**mm** : Milimetre

**cm** : Santimetre

**m** : Metre

**N** : Newton

**kN** : Kilonewton

**MPa** : Megapaskal

**s** : Saniye

**dk** : Dakika

**µs** : Mikrosaniye

**°C** : Santigrat Derece

**W/mK** : Watt / metre · Kelvin

**W·s<sup>1/2</sup>/(m<sup>2</sup>·K)** : Watt · saniye<sup>1/2</sup>/ metre<sup>2</sup> · Kelvin

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel

İnşaat sektöründe günümüzde en çok tartışılan konulardan biri, çevresel sürdürülebilirliği sağlarken aynı zamanda yapı malzemelerinin teknik performansını korumaktır. Özellikle Portland çimentosu gibi geleneksel bağlayıcıların üretimi, hem yüksek enerji tüketimine yol açmakta hem de ciddi düzeyde sera gazı emisyonuna neden olmaktadır (Turner ve Collins, 2013). Yıllık üretimi yaklaşık 20 milyar tonu aşan beton, su hariç tutulduğunda dünyada en fazla kullanılan yapı malzemesi konumundadır (Mehta ve Monteiro, 2014). Bu üretimin en temel bileşeni olan çimento ise, yalnızca 2010 yılı verilerine göre inşaat faaliyetlerinden kaynaklanan 7,7 milyar ton CO<sub>2</sub> salımının yaklaşık %36'sını oluşturmaktadır (Montes ve Hernandez, 2025). Bu oran, toplam insan kaynaklı emisyonların %8'ine denk gelmekte ve konunun küresel boyuttaki ciddiyetini ortaya koymaktadır (Miller vd., 2018). Dolayısıyla daha az karbon salımıyla üretilen, çevreye duyarlı bağlayıcıların geliştirilmesi artık sadece bilimsel bir merak değil, aynı zamanda acil bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu bağlamda, Davidovits'in 2013' de öncülüğünü yaptığı geopolimer teknolojileri, düşük karbon ayak izi ve yüksek dayanım potansiyeli ile günümüz araştırmalarında önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, geleneksel çimentoya alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu kapsamda özellikle endüstriyel yan ürünlerin ve doğal puzolanik minerallerin kullanımı dikkat çekmektedir. Geopolimer harçlar, düşük karbon ayak izi, yüksek mekanik dayanım, uzun hizmet ömrü ve atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi silis ve alümina açısından zengin malzemelerin alkali çözeltilerle aktive edilmesiyle elde edilen bu bağlayıcı sistemler, modern yapı teknolojilerinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Sülfat, asit ve benzeri agresif ortamlara karşı dayanıklılık göstermeleri, onları altyapı ve endüstriyel yapılarda cazip hale getirmektedir (Davidovits, 2013). Ayrıca yangın gibi yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek yapılarda güvenlik avantajı sağlamaları da önemli bir tercih sebebidir. Bu yönleriyle geopolimerler, yalnızca dayanım ve dayanıklılık açısından değil, çevresel sorumluluk bilinciyle tasarlanan sürdürülebilir malzeme anlayışına katkılarıyla da dikkat çekmektedir (Provis ve Van Deventer, 2014).

Sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında hafif beton da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Literatürde hafif betonlar, birim hacim ağırlığı 2000 kg/m<sup>3</sup>'ün altında olan betonlar olarak tanımlanmakta ve ısı yalıtım betonları, orta dayanımlı hafif betonlar ve taşıyıcı

hafif betonlar olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmaktadır (ACI 213R-14; EN 206). Hafif beton, normal betona kıyasla daha düşük birim hacim ağırlığına sahip olmasına rağmen yapısal güvenliği tehlikeye atmayan, yeterli dayanım ve dayanıklılık gösterebilen özel bir malzemedir. Bu beton türü, düşük ağırlığının yanı sıra ısı ve ses yalıtımındaki yüksek performansı ile de öne çıkmaktadır. Bu özellikler, onu yüksek katlı yapılarda, köprülerde, prefabrik elemanlarda ve yalıtım amaçlı uygulamalarda cazip hale getirmektedir (Neville, 2011). Hafif beton üretiminde iki yöntem ön plana çıkmaktadır. İlki, pomza, perlit, tuf, genişletilmiş kil ve diyatomit gibi gözenekli agregaların kullanımınıdır (Karakurt ve Özen, 2017). Örneğin, öğütülmüş diyatomitlerde hacim yoğunluğu 250–400 kg/m<sup>3</sup> seviyelerine kadar düşebilmektedir (Sezgin, 1998). Bu agregalar, yoğunluğu azaltırken aynı zamanda ısı ve ses yalıtım özelliklerini güçlendirmektedir. İkinci yöntem ise köpük beton veya gazbeton (AAC) gibi hücreli beton türlerinin üretimidir. Bu betonlarda karışıma gaz oluşturuvcu katkıları veya köpük ajanları eklenerek gözenekli bir yapı elde edilmekte, otoklav kürüne tabi tutulduğunda ise yeterli boyutsal kararlılık sağlanmaktadır (Amran vd., 2015). Dolayısıyla hafif beton, yalnızca yapısal yükleri azaltmasıyla değil, aynı zamanda enerji tasarrufu ve yaşam konforunu artıran özellikleriyle de sürdürülebilir malzeme seçenekleri arasında önemli bir yere sahiptir (Neville, 2011).

Bu noktada diyatomit, hem doğal kökeni hem de sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleriyle dikkat çeken bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Diyatomit, Bacillariophyta grubuna ait alglerin silisli kabuklarının fosilleşmesiyle oluşmuş, yüksek oranda amorf silika içeren, düşük yoğunluklu ve gözenekli yapıya sahip bir sedimanter kayadır. Fotosentetik özellikleri nedeniyle ekosistemde önemli bir rol oynayan diyatomların kalıntıları, zaman içinde birikerek geniş diyatomit yataklarını oluşturmuştur (Çetin ve Taş, 2012). Bu mineral, yalnızca inşaat sektöründe değil; filtrasyon, kimya, tarım, enerji ve gıda endüstrisi gibi pek çok alanda da yaygın kullanım alanına sahiptir (Werner, 1977). Dünya genelinde yıllık üretimin 2–2,5 milyon ton civarında olduğu bilinmekte, Türkiye ise yaklaşık 200–300 milyon tonluk rezerviyle önde gelen ülkeler arasında yer almaktadır. Özellikle Afyonkarahisar, Manisa, Balıkesir, Isparta, Nevşehir ve Van bölgeleri önemli diyatomit yataklarına ev sahipliği yapmaktadır. Buna rağmen, Türkiye'nin dünya rezervlerinin yaklaşık %5'ine sahip olmasına karşın bu malzemenin inşaat sektöründeki kullanımını hâlâ yeterince yaygın değildir.

Diyatomit; yüksek silis içeriği, gözenekli yapısı ve düşük yoğunluğu sayesinde hem bağlayıcı matrisin özelliklerini geliştirme hem de hafif yapı malzemelerinin üretiminde avantaj sağlama potansiyeline sahiptir (Pavliková vd., 2022). Yoğunluğu düşürerek harcın ağırlığını

azaltması ve yalıtım özelliklerini iyileştirmesi, onu sürdürülebilir yapı uygulamalarında cazip bir seçenek haline getirmektedir. Bununla birlikte, yüksek gözeneklilik mekanik dayanımlarda azalmaya yol açabilmektedir. Bu nedenle diyatomit katkılı sistemler genellikle hafif geopolimer harçlar, yalıtım panelleri veya taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında tercih edilmektedir (Uygunoğlu vd., 2006).

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmanın temel amacı, geleneksel çimento esaslı harçlara alternatif olarak geliştirilen geopolimer harçlarda, ülkemizde bol miktarda bulunan fakat hafif yapı elemanlarında yeterince değerlendirilmemiş olan diyatomitin agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Çalışmada, farklı oranlarda diyatomit katkısının birim hacim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenerek, daha hafif ve çevre dostu yapı malzemeleri geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Literatürde diyatomitin bazı çalışmalarda yalnızca katkı maddesi, bazılarında ise çimentoya veya uçucu küle alternatif bağlayıcı olarak kullanıldığı görülmektedir (Karahisar Gökkonca, 2010). Ayrıca farklı araştırmalarda belirli bölge diyatomitlerinin hafif yapı elemanlarının üretiminde agrega olarak değerlendirildiği görülmüştür. Diyatomitin agrega olarak kullanıldığı tüm çalışmalarda bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılmıştır.

Bu çalışmada ise diyatomit, CEN standart kumu ikame edecek şekilde agrega olarak kullanılmış; bağlayıcı olarak ise öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu tercih edilmiştir. Böylece hem hafif hem de çevre dostu geopolimer harçların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, diyatomitin inşaat sektöründe daha etkin bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacak ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çalışma, portland çimentosunun üretiminde ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılmasına yönelik sürdürülebilir bir çözüm önermesinde bulunmaktadır. Diyatomit, gözenekli yapısı ve yüksek silis içeriği sayesinde hem hafiflik hem de puzolanik katkı potansiyeli sunmaktadır (Uygunoğlu vd., 2006). Bu özellikler, geopolimer harçların çevresel performansını artırırken, enerji verimliliği yüksek ve ekonomik yapı elemanlarının üretimine olanak tanıyacaktır. Türkiye'nin farklı bölgelerinde geniş rezervlere sahip diyatomit yataklarının inşaat malzemesi sektöründe değerlendirilmesi hem ekonomik açıdan hem de çevresel sürdürülebilirlik bağlamında ulusal bir kazanım sağlayacaktır.

### **1.3. Çalışmanın Kapsamı**

Bu çalışmanın kapsamı, çimento kullanılmadan geliştirilen geopolimer harçlarda diyatomit kullanımının etkilerini incelemek üzerine kuruludur. Araştırmada CEN standart kumu ile Afyonkarahisar ve Polatlı bölgesinden temin edilen diyatomitlerin agrega olarak kullanıldığı geopolimer harç serileri üretilmiştir. Diyatomit, düşük özgül ağırlığı nedeniyle standart kum yerine farklı hacimsel oranlarda karışımlara dahil edilmiştir. Böylece, diyatomitin geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkisi ortaya konulmuştur.

Öncelikle kullanılan hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla diyatomitin kimyasal bileşimi XRF yöntemi ile analiz edilmiş, özgül ağırlığı ölçülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş GYFC ile laboratuvar ortamında oluşturulan harçlar standart yöntemlere uygun şekilde kalıplara dökülmüş ve ortam kürüne maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, ultra ses geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri ile ısı iletkenlik deneyi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu (FE-SEM) ile, elementel bileşimi Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ile belirlenmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar, hem kontrol serisi (sadece CEN standart kumu içeren karışımlar) hem de farklı oranlarda diyatomit içeren seriler arasında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu sayede, diyatomit katkısının geopolimer harçların mühendislik özellikleri üzerindeki olumlu ve olası olumsuz etkileri kapsamlı bir şekilde ortaya konulmuştur.

### **1.4. Diyatomit ve Geopolimer Harçlar İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar**

Şenol (2025) kahve telvesi gibi organik atıkların geri dönüştürülerek geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğini araştırmış ve bu yaklaşımı hibrit bağlayıcı sistemler kapsamında değerlendirmiştir. Çalışmada, kahve telvesi farklı oranlarda geopolimer matrislere eklenmiş ve üretilen numunelerin hem mekanik hem de fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bulgular, düşük oranlı ikamelerde basınç ve eğilme dayanımlarının büyük ölçüde korunabildiğini, aynı zamanda yoğunluğun azaldığını ve ısı yalıtım performansının iyileştiğini göstermiştir. Bununla birlikte atık katkısının çevresel etkileri değerlendirilmiş ve kahve telvesi gibi organik artıkların geopolimer sistemlere dâhil edilmesinin hem atık yönetimi hem de karbon ayak izinin azaltılması açısından önemli bir avantaj sunduğu ortaya konmuştur. Şenol'un çalışması, atıkların yapı malzemelerine entegre edilmesiyle hem çevresel hem de teknik kazanımlar elde edilebileceğini göstermesi açısından literatürde önemli bir yere sahiptir.

Montes-Hernandez (2025) ise, çimento endüstrisinin karbondan arındırılmasına yönelik çalışmasında diyatomit gibi düşük karbonlu hammaddelerin potansiyelini tartışmıştır. Araştırma, Portland çimentosunun üretiminde açığa çıkan yüksek CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılmasında geopolimer bağlayıcılar ve alternatif puzolanik malzemelerin rolünü irdelemiştir. Diyatomit örneği üzerinden yapılan değerlendirmelerde, bu malzemenin yüksek oranda amorf silis içermesi sayesinde geopolimerizasyon süreçlerine katkı sağlayabildiği ve böylece çimento üretiminde kısmi ikame malzemesi olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, diyatomit kullanımının yalnızca çevresel kazanımlar sağlamakla kalmadığı, aynı zamanda malzeme hafifliği, ısı yalıtımı ve düşük yoğunluk gibi mühendislik avantajları da sunduğu vurgulanmıştır. Montes-Hernandez'in çalışması, diyatomit gibi doğal kaynakların çimento sektörünün sürdürülebilir dönüşümünde kritik bir role sahip olabileceğini göstermiş ve bu tür malzemelerin gelecekteki araştırmalarda daha geniş ölçekte ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

El Miski ve arkadaşları (2025) diyatomitin kısmen çimento yerine kullanılabilirliğini ve bunun sürdürülebilir yapı malzemelerine katkısını incelemiştir. Çalışmada, farklı ikame oranlarında diyatomit kullanılarak üretilen harç ve beton numuneleri değerlendirilmiş, özellikle mekanik, kimyasal ve ısıl özellikler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bulgular, düşük oranlarda yapılan diyatomit ikamesinin basınç dayanımında önemli bir düşüşe yol açmadan yoğunluğu azalttığını ve aynı zamanda malzemenin ısı yalıtım özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Yüksek oranlarda ikamede ise mekanik dayanım değerlerinde belirgin kayıplar gözlenmiş, bu durum diyatomitin gözenekli yapısından ve bağlayıcı matrisin sürekliliğinin bozulmasından kaynaklanmıştır. Çalışmanın çevresel boyutunda ise diyatomitin, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük karbon ayak izine sahip olduğu vurgulanmıştır. Özellikle üretim sürecinde ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, diyatomitin çimento ikamesi olarak sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirilmesinde ciddi bir avantaj sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, ikame oranlarının mekanik performans, ısıl özellikler ve çevresel kazançlar arasında bir denge gözetilerek seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Araştırma, diyatomitin çimento esaslı sistemlerde kısmi bir bağlayıcı olarak kullanılmasının hem çevresel hem de teknik açıdan uygulanabilir olduğunu kanıtlamış ve gelecekte sürdürülebilir inşaat malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunduğunu göstermiştir.

Alvarado ve arkadaşları (2024) tarafından yürütülen çalışma, kaolin, diyatomit ve pirinç kabuğu külü (RHA) kullanılarak geliştirilen geopolimer bazlı yapı malzemelerinin tavan ısı yalıtımındaki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Araştırmada farklı oranlarda

hazırlanan karışımların mekanik ve ısı özellikleri test edilmiştir. Elde edilen bulgular, bu geopolimerlerin geleneksel betona kıyasla daha düşük ısı iletkenliğe sahip olduğunu ve 1 MPa'nın üzerinde basınç dayanımı gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu özellikler, malzemeyi tavan yalıtım uygulamaları için yeterli yapısal performansa sahip kılmaktadır. Ayrıca, diyatomit ve RHA katkılarının gözeneklilik ve yalıtım özelliklerini artırdığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu geopolimer kompozitlerin atık bazlı malzemeler kullanılarak üretilmesi, çevresel etkileri azaltan, sürdürülebilir ve enerji verimli bir yapı malzemesi alternatifini sunduğunu göstermektedir.

Ferreira ve arkadaşları (2024) diyatomlu toprağın fiziksel, kimyasal ve mikro yapısal özelliklerini inceleyerek, bu malzemenin çimento ve kireç esaslı harçlarda kullanım potansiyelini değerlendirmişlerdir. Çalışmada diyatomlu toprağın yüksek amorf silis içeriği ve gözenekli yapısının puzolanik reaktiviteye katkı sağladığı vurgulanmıştır. Deneyler, farklı ikame oranlarıyla hazırlanan harçlarda taze ve sertleşmiş özellikleri kapsamış; sonuçlar diyatomlu toprağın yoğunluğu düşürdüğünü, su emme oranını artırdığını ancak düşük ve orta ikamelerde dayanımın korunabildiğini göstermiştir. Dayanıklılık açısından diyatomlu toprağın katkısı, sülfat etkisi ve donma-çözülme koşullarında olumlu performans sergilemiş, mikroyapı incelemeleri ise bağlayıcı matrisin daha homojen bir yapı kazandığını ortaya koymuştur. Çalışma, diyatomlu toprağın karbon ayak izini azaltarak sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ve optimum ikame oranlarının kritik rol oynadığını göstermektedir.

Karabulut ve arkadaşları (2024) tarafından yürütülen bu çalışmada, çimento yerine farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15, %20) öğütülmüş diyatomit ikame edilerek üretilen beş farklı kendiliğinden yerleşen harç karışımının taze ve erken yaş mekanik özellikleri incelenmiştir. Taze özellikler, mini-çökme yayılma (240–260 mm) ve viskozimetre testleri ile belirlenmiş; su ihtiyacının diyatomit oranı arttıkça yükseldiği, viskozite değerlerinin ise referans karışımda diğer tüm serilerden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Mekanik testlerde, en yüksek eğilme ve basınç dayanımları %5 diyatomit katkılı seride elde edilirken, en düşük değerler %20 diyatomit içeren seride ölçülmüş ve bu oranlarda sırasıyla yaklaşık %67 ve %74 düşüş meydana gelmiştir. Sonuçlar, erken yaş dayanımlar açısından %5–%10 diyatomit ikamesinin uygun olduğunu göstermiş; ancak 28 ve 90 günlük dayanım verileri ile donma-çözülme, sülfat direnci, aşınma ve yüksek sıcaklık gibi dayanıklılık testlerinin de gelecekte yapılmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Pehlivan (2024) çalışmasında, farklı volkanik kökenli kayaçların sodyum hidroksit ile aktive edilerek geopolimer harç üretiminde kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu kapsamda pomza, tuf ve bazalt gibi volkanik kökenli hammaddeler değerlendirilmiş ve bu malzemelerden üretilen geopolimer harçların mekanik performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, kayaç türüne ve aktivatör özelliklerine bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde önemli farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Özellikle pomza ve tuf esaslı harçların gözenekli yapıları nedeniyle daha düşük yoğunluklu, ancak belirli oranlarda yeterli mekanik dayanım sergileyebildiği; bazalt katkısının ise daha yüksek dayanım sağladığı belirtilmiştir. Çalışma, volkanik kökenli malzemelerin geopolimer sistemlerde sürdürülebilir ve yüksek performanslı alternatif bağlayıcılar üretmek için uygun hammaddeler olabileceğini ortaya koymuştur.

Toprak ve arkadaşları (2022) çevre kirliliğini azaltmak amacıyla pişmiş kil (tuğla, kiremit) ve mermer atığı tozlarını geopolimer harç üretiminde hammadde olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada, bağlayıcı olarak atık tozlarının kullanımı ile harçların hem taze (işlenebilirlik) hem de sertleşmiş (mekanik ve fiziksel) özellikleri, farklı kür sıcaklıkları (60 °C ve 80 °C) altında test edilmiştir. Öne çıkan sonuçlardan biri, %50 tuğla tozu ve %50 mermer tozu içeren karışımların, yalnızca tuğla tozu kullanılanlara kıyasla yaklaşık %40 daha yüksek yayılma özelliği göstermesidir. Dayanım açısından, geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları, 28 günlük dayanımlarının %90'ına kadar ulaşmıştır. Ayrıca en yüksek basınç dayanımı 28,50 MPa ile %100 pişmiş kil tozu içeren harçlarda ve 80 °C kür uygulamasında elde edilmiştir. Bu bulgular, atık malzemelerin dengeli oranlarda kullanıldığı geopolimer harçların hem pratik hem de çevresel açıdan umut vadeden bir alternatif olduğunu göstermektedir.

İpek ve Ekmen (2022) inşaat sektöründe ortaya çıkan atık yapı malzemelerinin geri dönüştürülerek geopolimer harç üretiminde kum yerine kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada, farklı türde yapı malzemesi atıkları öğütülerek ince agrega boyutuna getirilmiş ve bu malzemeler geopolimer harç karışımlarında kısmen veya tamamen doğal kum yerine ikame edilmiştir. Deneysel süreçte elde edilen numuneler üzerinde yoğunluk, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme gibi temel mühendislik özellikleri değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, geri dönüştürülmüş atık malzemelerin kullanımının geopolimer harçların birim hacim ağırlığını düşürdüğünü ve yoğunluğu azaltarak hafif yapı malzemesi özellikleri kazandırdığını göstermiştir. Mekanik özellikler açısından ise, ikame oranı arttıkça basınç dayanımında belirli düşüşler gözlemlense de, düşük ve orta seviyelerdeki ikamelerin dayanım değerlerini kabul edilebilir sınırlar içinde tuttuğu belirlenmiştir. Ayrıca geri dönüştürülmüş

malzeme kullanımının harçların çevresel sürdürülebilirlik performansına önemli katkılar sunduğu vurgulanmıştır. Genel olarak çalışma, atık yapı malzemelerinin kum yerine değerlendirilmesinin hem atık yönetimi açısından çevresel bir çözüm sunduğunu, hem de geopolimer esaslı sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi için önemli bir potansiyel oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Pavlíková ve arkadaşları (2022) tarafından yürütülen bu çalışmada, diyatumlu toprağın tamir harçlarında puzolanik katkı maddesi olarak kullanım potansiyeli kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, diyatomitin Portland çimentosu ile kısmi ikamesinde mekanik dayanımı etkileyen üç ana mekanizmanın (dolgu etkisi, çimento hidrasyonunun hızlandırılması ve puzolanik reaksiyonlar) etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu katkılar, özellikle ilk 24 saatte priz sürelerini kısaltmakta ve erken dayanım gelişimini hızlandırmaktadır. 28 ve 90 günlük numunelerde yapılan analizler, hidrasyon ve puzolanik reaksiyonların ilerlediğini doğrulamıştır. Ayrıca, farklı mineral yapılar ve parçacık morfolojileri karışımının reolojik ve yapısal davranışını değiştirmiştir. Araştırmada, optimum çimento ikame oranının ağırlıkça %10 olduğu, ancak %15–20'ye kadar ikamelerin de yeterli mekanik performans sunduğu gösterilmiştir. Aktivite İndeksi değerlerine göre, incelenen diyatomit, yüksek reaktiviteye sahip puzolan olarak sınıflandırılmış ve aşırı nem içeren tarihi duvarcılıkta dahi kullanılabilir, dayanıklı tamir harçlarının tasarımı için uygun bulunmuştur. Akbaba (2020) yüksek puzolanik özelliğe sahip diyatomit agregalarının hafif beton blok üretiminde kullanımını ve bu blokların yüksek sıcaklık ile donma-çözülme süreçlerine maruz kaldıklarında gösterdikleri fiziko-mekanik davranışını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. 28 günlük kür sonrası blokların birim hacim ağırlığı, porozite, ultrases hızı, basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi özellikleri test edilmiştir. Donma-çözülme etkisi altında numunelerin ortalama %8,53 kütle kaybı yaşadığı, ufalanma ve parçalanma gibi fiziksel bozulmaların gözlemlendiği raporlanmıştır. Yüksek sıcaklığa (600 °C) maruz kalma durumunda ise numuneler yaklaşık %7,9 oranında kütle kaybına uğramış ancak basınç dayanımında ortalama %55,22 artış görülmüştür. Bu bulgular, diyatomit agregalı hafif blok elemanların donma-çözülme koşullarında fiziksel dayanımını kaybettiğini, ancak yüksek sıcaklık gibi aşırı ısıl yükler altında mekanik dayanım kazanımı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, diyatomitin hafif yapı malzemeleri üretimindeki potansiyelini pekiştirirken, çevresel ve yapısal dayanıklılık açısından önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır.

Çelikten (2019) çalışmasında, alkali ile aktive edilmiş hafif betonların taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, geleneksel Portland çimentosu yerine alkali aktivasyon

yöntemiyle elde edilen bağlayıcı sistemlerin hafif beton üretiminde kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu kapsamda, pomza, perlit ve genişletilmiş kil gibi farklı tür ve oranlarda hafif agregalar kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, su emme, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısı gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, alkali ile aktive edilmiş hafif betonların düşük yoğunluk ve yüksek yalıtım performansı sunduğunu, buna karşın dayanım değerlerinin agrega türüne ve aktivatör özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu betonların çevresel açıdan daha sürdürülebilir olduğu, çimento kullanımını azaltarak karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağladığı vurgulanmıştır. Çalışma, alkali aktivasyon teknolojisinin hafif beton üretiminde hem teknik hem de çevresel açıdan önemli bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Ahmadi ve arkadaşları (2018) tarafından yürütülen bu çalışmada, çimentonun %15, %30 ve %40'ı oranında ham diyatomit tozu ile ikame edildiği çevre dostu harçların mekanik, dayanıklılık ve çevresel etkileri araştırılmıştır. Taze harçların işlenebilirliği yayılma tablası deneyiyle belirlenmiş; basınç ve doğrudan çekme dayanımları 3, 7, 28 ve 91 günlük yaşlarda ölçülmüştür. Ayrıca, 28 günlük numunelerde su emme ve ultrases geçiş hızı testleri yapılarak taşıma özellikleri ve dayanıklılık indeksleri incelenmiştir. Bulgular, %40'a kadar ham diyatomit kullanımının basınç dayanımında önemli bir düşüşe yol açmadan, geç yaşlarda çekme dayanımı ve taşıma özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Çevresel etki analizi, yüksek hacimli ham diyatomit katkısının çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonunu ve genel çevresel yükü önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuş; bu durum, söz konusu malzemeyi sürdürülebilir ve ekonomik bir çimento esaslı yapı malzemesi alternatifi haline getirmiştir.

Miller ve arkadaşları (2018) küresel çimento endüstrisinin karbon ayak izini azaltmaya yönelik malzeme temelli stratejileri derinlemesine inceleyen kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırma, özellikle "Çevre Dostu Çimentolar" kavramına odaklanmakta ve alternatif katkı maddeleriyle birlikte geopolimer gibi bağlayıcıların yıllık CO<sub>2</sub> emisyonlarını düşürmedeki potansiyelini değerlendirmektedir. Çalışmada, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve benzeri tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanımıyla geleneksel Portland çimentosunun yerine geçen ya da bir kısmını ikame eden karışımlar analiz edilmiştir. Bulgular, bu tür düşük karbonlu katkıları kullanıldığında betonun karbon ayak izinde %5–20 aralığında azalma görülebildiğini göstermiştir. Geopolimer bağlayıcı sistemleri ve endüstriyel atık katkılı karışımlar; hem çevresel hem de mühendislik performansı açısından gelecek vaat eden alternatifler olarak ön plana çıkmaktadır.

Karakurt ve Özen (2017) farklı doğal hafif agregaların beton özellikleri üzerindeki etkilerini mercek altına almışlardır. Araştırmada, Ankara'daki pomza ve perlit, Manisa-Salihli'den elde edilen pomza, Antalya'daki volkanik tuf ve Hollanda'dan temin edilen genleştirilmiş kil gibi çeşitli doğal hafif agregalar kullanılmıştır. Agregalar, uygun tane boyutuna ayrılarak beton üretiminde test edilmiştir. Deneysel bölümde taze betonun kıvamı çökme ve yayılma tablası deneyleriyle, sertleşmiş betonun ise birim hacim ağırlık, ultrases hızı ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri numuneler üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki; volkanik tuf agregalarıyla üretilen betonlar 25 MPa üzerinde basınç dayanımı sağlayabilmiştir. Güncellenmiş kil ve perlit kullanımı ise taze betonun işlenebilirliğini azaltmıştır. Bu bulgular, doğal hafif agregaların uygun seçim ve sınıflamalarla yapısal hafif beton üretiminde başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle volkanik tuf gibi agregalar, yapının hem hafifliğini korurken hem de mekanik performansı yeterli seviyede tutabilmektedir.

Sarıdemir (2016) tarafından yürütülen araştırmada, alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş diatomit kullanılarak üretilen harçların mekanik performansları incelenmiştir. Çalışmada özellikle diatomitin puzolanik potansiyeli ve gözenekli yapısının, harçların dayanım ve yoğunluk özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Araştırmada farklı  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  aktivatör konsantrasyonları ve kür koşulları uygulanmış, elde edilen numunelerde eğilme ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Bulgulara göre diatomit oranının artması, harçların gözenekli yapısını artırarak yoğunluğu düşürmüştür; ancak bu durum aynı zamanda mekanik dayanımlarda azalmaya neden olmuştur. Özellikle yüksek ikame oranlarında basınç dayanımında belirgin düşüşler gözlenmiştir. Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, kür koşullarının sonuçlar üzerindeki belirleyici etkisidir. Islak kür koşullarında numuneler daha yüksek dayanım göstermiş, ayrıca eğilme ve basınç dayanımı arasında güçlü bir korelasyon tespit edilmiştir. Bu sonuç, diatomitli harçlarda matrisin sürekliliğinin nem koşullarına duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Sarıdemir'in çalışması; diatomitin düşük yoğunluklu ve ısı yalıtımı yüksek geopolimer esaslı harç üretiminde kullanılabilir olduğunu, ancak ikame oranı ve kür koşullarının dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Gündüz ve Kalkan (2016) diatomitin geopolimer üretiminde katkı malzemesi olarak kullanımını ele almış ve özellikle malzemenin yüksek amorf silis içeriğinin bağlayıcı sistemlere etkilerini incelemiştir. Çalışmada, farklı oranlarda diatomit içeren karışımlar hazırlanarak yoğunluk, basınç dayanımı ve ısı iletkenliği gibi temel mühendislik özellikleri değerlendirilmiştir. Bulgular, diatomit katkısının gözenekli yapısı nedeniyle harç ve betonların

birim hacim ağırlığını düşürdüğünü, bu sayede daha hafif yapı malzemeleri üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. Ayrıca, diyatomitin yüksek gözenekliliğinin ısı yalıtımı performansını belirgin şekilde artırdığı; ancak aynı durumun mekanik dayanım üzerinde olumsuz bir etki yarattığı ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlar, düşük oranlarda diyatomit ilavesinin hem yoğunluğu azaltıp hem de dayanımı kabul edilebilir düzeylerde tuttuğunu, fakat yüksek oranlarda ikamede dayanım kayıplarının arttığını ortaya koymuştur.

ACI Committee 213 (2014) tarafından yayımlanan Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete (ACI 213R-14) raporu, hafif beton teknolojisi konusunda en detaylı teknik kaynaklardan biridir. Raporda hafif agregaların türleri, üretim yöntemleri, fiziksel ve mekanik özellikleri ayrıntılı olarak tanıtılmış; bu agregalarla üretilen hafif betonların karışım tasarımı, üretim teknikleri, dayanım özellikleri ve dayanıklılık performansları kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Özellikle düşük yoğunluklu ve yüksek yalıtım özelliklerine sahip hafif betonların yapısal ve yapısal olmayan uygulamalardaki avantajları vurgulanmış; bu malzemelerin enerji verimliliği, yangın dayanımı ve deprem davranışı gibi konulardaki katkılarına dikkat çekilmiştir. Ayrıca raporda hafif betonun mevcut standartlar çerçevesinde nasıl sınıflandırılacağı, hangi deney yöntemleriyle değerlendirileceği ve saha uygulamalarında nelere dikkat edilmesi gerektiği de ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Provis ve van Deventer (2014) Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM başlıklı raporlarında, geopolimerler ve alkali ile aktive edilmiş malzemeler üzerine geniş kapsamlı bir değerlendirme sunmuşlardır. Çalışmada, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve doğal silisli hammaddeler gibi farklı prekürsörlerin aktivasyon mekanizmaları karşılaştırılmış, aktivatör türleri (NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> vb.) ve çözelti/katı oranlarının malzeme özelliklerine etkileri detaylı biçimde açıklanmıştır. Raporda ayrıca kür sıcaklığı, süre ve nem koşullarının geopolimerlerin nihai özellikleri üzerindeki kritik rolü vurgulanmıştır. Mekanik özelliklerin yanı sıra, malzemelerin sülfat, asit ve donma-çözülme gibi çevresel etkiler karşısındaki dayanıklılıkları da değerlendirilmiştir. Provis ve van Deventer, alkali ile aktive edilmiş sistemlerin geleneksel çimento bazlı sistemlere kıyasla hem teknik hem de çevresel açıdan güçlü alternatifler sunduğunu belirtmiş, ancak standardizasyon ve saha uygulamalarında yaşanan zorluklarını da vurgulamıştır.

Turner ve Collins (2013) çalışmasında Portland çimentosu ve geopolimer betonların karbon dioksit eşdeğer emisyonlarını karşılaştırmalı olarak ele almışlardır. Araştırmada, çimento üretiminin küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olduğu belirtilmiş, bu bağlamda alternatif bağlayıcı sistemlerin çevresel önemi vurgulanmıştır. Çalışmada farklı

hammadde kaynakları, aktivatör tipleri ve kür rejimleri dikkate alınarak hazırlanan geopolimer karışımları değerlendirilmiş ve sonuçlar geleneksel PC betonları ile kıyaslanmıştır. Bulgular, geopolimer betonların üretim sürecinde PC betonlara göre %44 ile %80 arasında daha düşük karbon salımı sağladığını göstermiştir. Bunun yanında, geopolimer betonların mekanik dayanım açısından da PC betonlarla kıyaslanabilir hatta bazı durumlarda üstün performans sunduğu rapor edilmiştir. Turner ve Collins, geopolimerlerin çevresel faydalarının özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle daha da arttığını ifade etmişlerdir.

Davidovits (2013) Geopolymer Chemistry and Applications adlı eserinde geopolimerlerin bilimsel temellerini ortaya koyarak alanın en önemli referanslarından birini oluşturmuştur. Yazar, geopolimerlerin temelinde alümino-silikat esaslı hammaddelerin alkali çözeltiler aracılığıyla polikondenzasyon reaksiyonlarına girmesiyle oluşan üç boyutlu ağ yapısının bulunduğunu vurgulamaktadır. Bu ağ yapısı, malzemeye yüksek basınç dayanımı, düşük geçirgenlik, yangın ve kimyasal etkilere karşı direnç gibi özellikler kazandırmaktadır. Çalışmada ayrıca geopolimerlerin çevresel avantajları detaylı olarak tartışılmış, Portland çimentosuna kıyasla üretim aşamasında %40–80 arasında daha düşük CO<sub>2</sub> salımı yaptığı ortaya konmuştur. Davidovits, farklı geopolimer türlerini (örneğin polisialat-siloks, polisialat-disiloks) sınıflandırarak, bu malzemelerin sadece yapı sektöründe değil, refrakter malzemelerden nükleer atık immobilizasyonuna kadar geniş bir kullanım alanına sahip olabileceğini göstermiştir.

Gültürk ve Güden (2011) bu çalışmada, diyatomitlerin polimer kompozitlerde kullanım olanakları ve diyatomit katkılı epoksi kompozitlerin ısıl özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, yüksek oranda silis içeren diyatomit kabuklarının (frustüller) polimer matrislere eklenmesiyle elde edilen kompozitlerin yapısal ve ısıl davranışları incelenmiştir. Diyatomitlerin gözenekli ve mikro-nanometrik yapıları sayesinde polimer matris içinde dolgu malzemesi olarak işlev gördüğü, böylece kompozitlerin yoğunluğunun azaltıldığı ve ısıl özelliklerinin değiştirildiği ortaya konmuştur. Deneysel bulgular, diyatomit katkısının epoksi kompozitlerin ısıl kararlılığını ve ısıl yalıtım özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, katkı oranına bağlı olarak matris-dolgu etkileşimlerinde farklılıklar gözlenmiş; yüksek oranlı katkılarda homojen dağılımın zorlaştığı belirtilmiştir.

Karahisar Gökkonca (2010) diyatomitin yapı malzemeleri endüstrisinde kullanım potansiyelini inceleyen yüksek lisans tezinde, özellikle malzemenin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine odaklanmıştır. Çalışmada, farklı bölgelerden elde edilen diyatomit

numuneleri laboratuvar ortamında detaylı şekilde karakterize edilmiş; XRD, XRF ve piknometre deneyleriyle mineral bileşimi, amorf silis oranı ve özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Bulgular, diyatomitin yüksek oranda amorf silis içerdiğini ve gözenekli yapısı sayesinde hem bağlayıcı özellik gösterme hem de hafif agrega olarak kullanılabilme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmada ayrıca, diyatomitin yapı malzemelerinde ikame veya katkı maddesi olarak kullanıldığında sağladığı avantajlar değerlendirilmiştir. Özellikle düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ve iyi ısı yalıtım özellikleri, malzemenin hafif beton ve sıva harçlarında değerlendirilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, diyatomitin gözenekli yapısı nedeniyle su emme oranının yüksek olduğu ve bu durumun malzemenin dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği vurgulanmıştır.

Pimraksa ve Chindapasirt (2009) Tayland'ın kuzeyinde yer alan Lampang bölgesinden elde edilen diyatomlu toprağın hafif tuğla üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bulgular, işlenmemiş diyatomlu toprak katkılı tuğlaların 14,5 MPa basınç dayanımı ve 0,88 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değerlerine ulaştığını ortaya koymuştur. Daha dikkat çekici olan sonuç ise, 500 °C'de kalsine edilen diyatomlu toprak kullanımıyla basınç dayanımının 17,5 MPa'ya yükselmesi ve yoğunluğun 0,73 g/cm<sup>3</sup>'e kadar düşmesidir. Bu bulgu, kalsinasyonun gözenek yapısını düzenleyerek ve mineral fazları aktive ederek mekanik özellikleri geliştirdiğini göstermektedir. Araştırma, diyatomlu toprağın yalnızca hafif tuğla üretiminde değil, aynı zamanda yüksek dayanım ve düşük yoğunluk kombinasyonu gerektiren farklı inşaat malzemelerinde de potansiyel bir katkı maddesi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.

Uygunoğlu ve arkadaşları (2006) Afyonkarahisar bölgesinden temin edilen diyatomit agregalarının hafif beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deney sonuçları, diyatomit kullanımının betonun yoğunluğunu belirgin şekilde azalttığını, böylece malzemenin hafif beton sınıfına girecek şekilde değerlendirilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, diyatomit agregalarının gözenekli yapısı nedeniyle su emme oranlarının yükseldiği, bu durumun ise betonun dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği belirtilmiştir. Basınç dayanımı açısından incelendiğinde, diyatomit miktarının artışıyla dayanım değerlerinde bir düşüş olduğu görülmüştür. Ancak bu azalma, ısı yalıtımı ve hafiflik gibi avantajlarla birlikte değerlendirildiğinde, malzemenin özellikle enerji verimliliği ve taşıyıcı olmayan yapı elemanları için uygun bir seçenek olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bazı numunelerin mikro yapısı SEM ile incelenmiş ve diyatomitin beton matrisinde homojen dağılım gösterdiği, ancak boşluk yapısını artırarak dayanım üzerinde sınırlayıcı bir rol oynadığı ifade edilmiştir.

Sezgin (1998) diyatomitin hafif yapı malzemeleri üretiminde değerlendirilebilirliğini araştırdığı yüksek lisans tezinde, özellikle diyatomit katkısının tuğla ve benzeri yapı elemanları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, diyatomitin yüksek gözenekliliği sayesinde numunelerin yoğunluğunu düşürdüğünü, bu özelliğiyle malzemeyi hafif yapı elemanları sınıfına uygun hale getirdiğini ortaya koymuştur. Araştırmada ayrıca diyatomitin puzolanik özellikleri üzerinde durulmuş ve bu yönüyle bağlayıcı matrisin reaksiyonlarını destekleyebileceği belirtilmiştir. Diyatomit katkısının mekanik dayanımı belirli ölçüde düşürmesine rağmen, ısı yalıtım performansını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu durum, özellikle taşıyıcı olmayan ve enerji verimliliği ön planda olan yapı elemanlarında diyatomitin kullanımını cazip hale getirmektedir.

Round ve arkadaşları. (1990) *The Diatoms: Biology ve Morphology of the Genera* adlı kapsamlı eserlerinde diyatomların biyolojik özelliklerini, silisli kabuklarının (frustül) morfolojisini ve bu organizmaların çevresel dağılımını detaylı biçimde incelemiştir. Yazarlar, diyatom kabuklarının gözenekli ve ince yapısının onları olağanüstü bir filtreleme malzemesi haline getirdiğini, aynı zamanda yüksek oranda amorf silis içermeleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda önemli bir potansiyele sahip olduklarını belirtmişlerdir. Özellikle diyatomit agregalarının gözenekli yapısı ve yüksek silis içeriği, diyatomitin amorf silis kaynağı olarak reaktivitesini açıklamaktadır.

## 2. MALZEMELER VE YÖNTEM

### 2.1. Malzemeler

Bu bölümde, tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin türleri ve özellikleri ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

#### 2.1.1. Diyatomit

Diyatomit, tek hücreli mikroskobik alg türlerinden olan diyatomların silisli kabuklarının birikmesiyle oluşan, biyojenik kökenli, doğal ve gözenekli bir silisli kayadır. Diyatomların kabukları, karmaşık ve düzenli mikro gözenek yapısına sahip olup yüksek oranda amorf silis ( $\text{SiO}_2$ ) içermektedir. Zaman içinde bu kabukların göl veya deniz ortamlarında çökmesi ve milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler boyunca sıkışıp taşlaşması sonucunda diyatomit yatakları meydana gelmiştir. Bu nedenle diyatomit, fosil kökenli bir mineral olarak sınıflandırılır ve yüksek yüzey alanı, düşük yoğunluğu ve gözenekli yapısıyla dikkat çeker (Round vd., 1990).

Kimyasal bileşim açısından diyatomit genellikle %60–90 oranında amorf silis ( $\text{SiO}_2$ ) içerir. Ayrıca daha düşük miktarlarda alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) ve alkali oksitler de bünyesinde bulunur. Bu özellikler, diyatomitin puzolanik davranış göstermesine ve bağlayıcı sistemlerde reaktif rol üstlenmesine imkân verir (Davidovits, 2013). Diyatomit, %80–85 oranında poroziteye sahiptir ve gevşek yoğunluğu yaklaşık  $0,25 \text{ gr/dm}^3$  seviyelerindedir. Su emme kapasitesi oldukça yüksektir; işlenmemiş halde ağırlığının 3–4 katı, kalsinasyon sonrası ise 5–10 katı kadar suyu absorbe edebilir. Isı iletkenliği çok düşük olup,  $100\text{--}300^\circ\text{C}$  arasında  $0,08 \text{ kcal/m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ , yüksek sıcaklıklarda ise  $0,11 \text{ kcal/m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{h}$  civarında değerler göstermektedir. Bu nedenle hafiflik, ısı ve ses yalıtımı, absorpsiyon gibi avantajlı özellikler kazandırır (Sezgin, 1998). Sertlik derecesi ham halde Mohs ölçeğine göre 1,5, kalsinasyon sonrası ise 5,5–6,0 seviyelerine ulaşabilmektedir. Diyatomit yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir mineral olup, bileşimindeki safsızlıklara bağlı olarak  $1000\text{--}1590^\circ\text{C}$  arasında erime noktasına sahiptir. Ayrıca birçok kimyasal maddeye karşı inerttir, yalnızca kuvvetli alkaliler ve florik asit (HF) ile yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girer.

Türkiye, diyatomit rezervleri bakımından önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle Afyonkarahisar, Ankara (Polatlı), Kütahya ve Çanakkale bölgelerinde yaygın diyatomit yatakları bulunmaktadır. Bu yerli kaynakların inşaat malzemesi sektöründe değerlendirilmesi hem ekonomik katkı sağlamak hem de sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmektedir (Uygunoğlu ve Ünal, 2006). Türkiye’de diyatomit üzerine araştırmalar 1950’li yıllarda şeker

sanayi bünyesinde başlamış, 1980’li yıllarda Ankara Etimesgut’ta kurulan 3000 ton/yıl kapasiteli aktif kizelgur fabrikası ile endüstriyel ölçekte üretime geçilmiştir. Ancak rezervlerin işletilebilirliği, kalite farklılıkları ve işleme teknolojisinin sınırlılıkları nedeniyle kullanım potansiyeli henüz tam anlamıyla değerlendirilmemiştir.

Kullanım alanları son derece geniştir. En yaygın kullanımı filtrasyon sektöründe olup, şeker, bira, şarap, meyve suyu, içecek sanayi, yağ arıtımı, ilaç endüstrisi, kimya sektörü ve atık su arıtma gibi birçok alanda filtre yardımcı maddesi olarak değerlendirilmektedir. Gözenekli yapısı nedeniyle filtreleme özelliği yüksek, düşük ısı iletkenliği sayesinde de yalıtım malzemesi olarak etkilidir. Bunun yanı sıra boya, diş macunu, lastik, plastik, kozmetik, kağıt, kibrit ve temizlik ürünlerinde katkı maddesi olarak; kimyasal reaksiyonlarda katalizör taşıyıcısı olarak; ayrıca izolasyon malzemeleri, hafif yapı elemanları, refrakter ürünler ve seramik hammaddesi üretiminde kullanılmaktadır.

İnşaat sektöründe çimento veya harç sistemlerinde katkı veya hafif agrega olarak kullanıldığında hem yoğunluğun düşmesine hem de puzolanik reaksiyonlarla dayanım gelişimine katkı sağlamaktadır (Karahisar Gökkonca, 2010).



**Şekil 2.1.** Diyatomit

**Kaynak:** (SEPMAŞ, 2025)

Şekil 2.1’ de görseli sunulan diyatomitin ekonomik ve endüstriyel önemi de dikkate değerdir. Dünya diatomit pazarı yıllık yaklaşık %6 oranında büyümektedir. Tüketimin yaklaşık %60’ı filtrasyon, %20’si katkı maddesi, %5–10’u yalıtım ve refrakter malzemeler, geri kalan kısmı ise diğer özel amaçlarda değerlendirilmektedir. Örneğin yıllık tüketim Amerika’da 1,5 milyon ton, Almanya’da 150 bin ton, İngiltere’de 70 bin ton civarındadır. Buna karşın

Türkiye’de tüketim yalnızca yaklaşık 2000 ton seviyesindedir. Bu fark, sanayi gelişmişliği ile doğrudan ilişkilendirilmektedir.

Bu özellikleriyle diyatomit, hem Dünya çapında hem de Türkiye’de geniş kullanım alanına sahip, ekonomik değeri yüksek ve stratejik öneme sahip bir mineraldir. Son yıllarda geopolimer sistemlerde diyatomit kullanımını da dikkat çekmektedir. Yüksek silis içeriği alkali aktivasyon süreçlerinde reaktif rol oynayarak bağlayıcı jellerin oluşumunu destekler, düşük yoğunluğu ise hafif yapı elemanlarının üretilmesine imkan verir. Geopolimer sistemlerde kullanılabilirliği üzerine yapılan araştırmalar, bu doğal kaynağın gelecekte sürdürülebilir ve çevreci yapı malzemelerinin geliştirilmesinde önemli rol oynayacağını göstermektedir.

Bu çalışmada ikame agrega olarak Afyonkarahisar ve Polatlı bölgelerinden temin edilen diyatomitler kullanılmıştır. Şekil 2.2’ de Afyonkarahisar diyatomit yatağının bir görseli sunulmaktadır.



**Şekil 2.2.** Afyonkarahisar Diyatomit Yatağı

**Kaynak:** (ZM, 2025)

Çalışmada kullanılan Afyonkarahisar ve Polatlı kökenli diyatomitlerin kimyasal bileşimleri X-ışını floresansı (XRF) analizi ile belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 2.1’ de sunulmuş olup her iki diyatomitin de yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içerdiğini, ancak oranların bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Polatlı diyatomitinde SiO<sub>2</sub> oranı %60,73 iken, Afyonkarahisar diyatomitinde bu oran %87,87 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, Afyonkarahisar diyatomitinin daha yüksek saflıkta silis içerdiğini ve puzolanik reaktivite açısından daha avantajlı olabileceğini göstermektedir. Buna karşılık Polatlı diyatomiti, daha yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%11,67) içeriğiyle Al katkısının geopolimerleşme sürecine daha fazla katkı sağlayabileceğini düşündürmektedir.

**Tablo 2.1.** Polatlı ve Afyon Diyatomit XRF Analizi

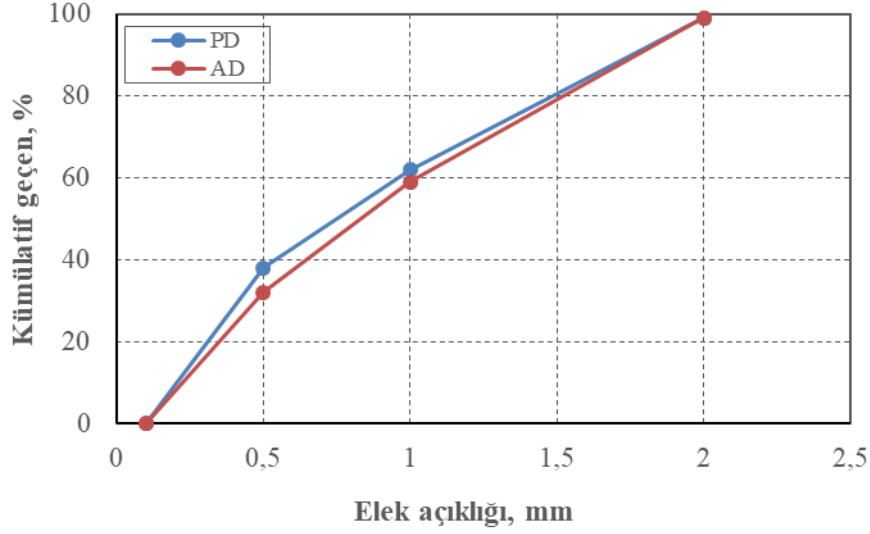
| Bileşen                        | Polatlı (%) | Afyon (%) |
|--------------------------------|-------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 60,73       | 87,87     |
| CaO                            | 4,94        | 1,26      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,67       | 1,13      |
| MgO                            | 2,22        | 0,37      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,51        | 0,65      |
| SO <sub>3</sub>                | 0,07        | 0,03      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1,58        | 0,09      |
| K <sub>2</sub> O               | 0,63        | 0,13      |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,43        | 0,15      |

Her iki diyatomitteki CaO içerikleri de farklılık göstermektedir. Polatlı diyatomitinde CaO oranı %4,94 iken, Afyonkarahisar diyatomitinde yalnızca %1,26'dır. Yüksek CaO içeriği, Polatlı diyatomitinin C-A-S-H benzeri fazların oluşumuna katkı sağlayabileceğini, Afyonkarahisar diyatomitinin ise daha çok N-A-S-H türü geopolimer jellerin gelişimine elverişli olduğunu işaret etmektedir.

MgO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikleri de Polatlı diyatomitinde (%2,22 ve %2,51) Afyonkarahisar diyatomitine (%0,37 ve %0,65) göre belirgin şekilde yüksektir. Bu durum, Polatlı diyatomitinin görece daha koyu renkte olduğunu gösterir. Ayrıca MgO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>'ye kıyasla daha yüksek özgül ağırlığa sahip oksitler olduğundan, Polatlı diyatomitinin yoğunluğunu artırıcı yönde etki eder. Buna karşın Afyonkarahisar diyatomiti, yüksek saflıktaki SiO<sub>2</sub> içeriği sayesinde daha beyaz/açık renkte ve daha düşük yoğunluktadır.

Her iki diyatomitte de SO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O ve Na<sub>2</sub>O oranları düşük seviyelerde bulunmuştur. Ancak Polatlı diyatomitinde Na<sub>2</sub>O (%1,43) ve P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%1,58) değerleri görece daha yüksektir. Bu bileşenler, özellikle alkali aktivasyon sürecinde çözünürlük ve reaktivite üzerinde dolaylı etkilere sahip olabilir.

Diyatomit kayaç parçaları laboratuvarında çekiç ile kırılarak küçültülüp agrega haline getirilmiştir. Hazırlanan diyatomit agregalar TS EN 933-1' e göre elek analizine tabi tutulmuştur ve harçlarda kullanılmak üzere CEN standart kum ile aynı boyutta (0,1-2 mm) olacak şekilde hazırlanmıştır (TS EN 933-1, 2012). Şekil 2.3. Diyatomit Agrega Tane Dağılım Eğrisini göstermektedir.



**Şekil 2.3.** Diyatomit Agregatane Dağılım Eğrisi

Diyatomit agregalar piknometre deneyine tabi tutulmuştur. AD özgül ağırlığı 1,67, su emme yüzdesi 0,99; PD özgül ağırlığı 1,84, su emme yüzdesi 0,93 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.4'de agregaların hazırlık sürecinden bir görsel paylaşımıdır.



**Şekil 2.4.** Laboratuvarında Agregat Hazırlığı

### 2.1.2. CEN Standart Kum

Geopolimer ve çimento esaslı harçların deneysel çalışmalarında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek için CEN Standart Kum yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kum, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) tarafından belirlenen fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, kuvars esaslı doğal bir agregat olup, özellikle basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde

bağlayıcı malzemelerin performansını değerlendirmede referans agregası olarak kullanılmaktadır (EN 196-1, 2016).

CEN Standart Kum, doğal silis kumundan hazırlanmakta olup, tane boyut dağılımı sıkı sınırlarla tanımlanmıştır. Kumun fraksiyonları 0,08 mm – 2,00 mm aralığında yer almakta ve 0,5 mm–1,0 mm boyutları arasında yoğunlaşmaktadır. Granülometri eğrisi, her partide aynı olacak şekilde standardize edilmiştir. Böylece deneysel sonuçlarda farklı kum örneklerinden kaynaklanabilecek değişkenlik minimuma indirilmektedir (EN 196-1, 2016). CEN standart kumun özgül ağırlığı 2,56, %0,63 su emme oranına sahip olup minimum %98 SiO<sub>2</sub> içeriğine sahip doğal silika kumundan elde edilen yuvarlak tanelerden oluşmaktadır (Şenol, 2025). CEN Standart Kumun ana bileşeni olan yüksek saflıkta kuvars (SiO<sub>2</sub>) dışında içeriğinde çok düşük miktarda kil, feldispat veya diğer mineraller bulunabilmektedir. Silis oranının çok yüksek olması sayesinde kimyasal olarak inerttir ve deneylerde yalnızca fiziksel rol üstlenir. Bu değerler ve özellikler onu deneysel karşılaştırmalar için uygun bir referans agrega haline getirmektedir.

Numune karışımlarında CEN Standart Kum, kontrol serilerinde tek başına agrega olarak kullanılmış, diyatomit ile yapılan deneysel serilerde karşılaştırma amacıyla referans malzeme görevi görmüştür. Böylece diyatomit katkısının birim hacim ağırlık, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkileri, standart koşullarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilmiştir. Tablo 2.2’de sunulan değerler CEN standart kumunun tane boyu dağılım aralıklarını temsil eder. (EN 196-1, 2016).

**Tablo 2.2.** CEN Standart Kumunun Granülometrisi

| Elek Açıklığı (mm) | Geçen Miktar % |
|--------------------|----------------|
| 2,00               | 100            |
| 1,60               | 88 – 98        |
| 1,00               | 62 – 72        |
| 0,50               | 28 – 38        |
| 0,16               | 8 – 18         |
| 0,08               | 0 – 2          |

**Kaynak:** (EN 196-1,2016)

### 2.1.3. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretimi sırasında yüksek fırında cevherin indirgenmesi esnasında ortaya çıkan yan ürünlerden biridir. Demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 1500–1600°C) indirgenerek sıvı ham demir elde edilirken, bu işlem

sonucunda ergimiş halde cüruf da oluşur. Üretim sürecinde ergimiş halde oluşan  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  esaslı oksitler birleşerek cürufu meydana getirir (Neville, 2011). Granülasyon yöntemiyle ani soğutulduğunda camsı yapı kazanır ve “granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)” adını alır. Yavaş soğutulduğunda ise kristalin yapıda düşük reaktiviteye sahip bir malzeme oluşur (ACI Committee 213, 2014).

Cürufların kimyasal bileşimi genellikle %30–45  $\text{CaO}$ , %28–38  $\text{SiO}_2$ , %7–16  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve %8–12  $\text{MgO}$  aralığında değişmektedir. Bu oranlar cürufa hem puzolanik hem de latent hidrolik özellikler kazandırmaktadır (Provis ve van Deventer, 2014). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (OGYFC), çimento ve bağlayıcı sistemlerde klinker yerine ikame edilerek kullanılabilir. Avrupa standartlarına göre CEM III tipi çimentolarda %36–95 arasında GYFC yer alabilmektedir (EN 197-1, 2011).

Fiziksel özellikler, soğutma şekline bağlı olarak farklılık göstermektedir. Ani su ile soğutulmuş GYFC, camsı yapısı sayesinde yüksek özgül yüzey alanı ve yüksek reaktiviteye sahiptir. Bu yapı, alkali aktivasyonla N-(C)-A-S-H jellerinin oluşmasına katkı sağlayarak dayanım ve geçirimsizlik açısından avantaj sağlamaktadır (Davidovits, 2013). Yavaş soğutulmuş cüruf ise kristalin fazların varlığı nedeniyle düşük reaktivite gösterir.

Türkiye’de GYFC üretimi, demir-çelik tesislerindeki pik demir üretimine bağlıdır. 2024 yılı itibarıyla Türkiye’nin sıcak metal üretimi yaklaşık 10,2 milyon ton olup, bunun 2,5–3 milyon ton civarında cüruf potansiyeline karşılık geldiği hesaplanmaktadır. Bu miktarın değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Kullanım alanları arasında çimento üretiminde klinker yerine kısmi ikame malzemesi, hazır beton ve harçlarda mineral katkı, geopolimer üretiminde ana bağlayıcı, yol dolguları, zemin iyileştirme, yalıtım malzemeleri ve seramik hammaddesi sayılabilir (Turner ve Collins, 2013). Çimento üretiminde klinker yerine GYFC’ nin kullanılması, enerji tüketimini azaltmakta ve  $\text{CO}_2$  emisyonlarını ciddi oranda düşürmektedir (Montes-Hernandez, 2025).

GYFC kullanımı, çevresel ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Çimento üretiminde klinker miktarının azaltılması, enerji tüketimini düşürmekte ve  $\text{CO}_2$  emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çelik üretiminin yan ürünü olarak ortaya çıktığından, atık malzemenin değerlendirilmesi ve dögüsel ekonomiye kazandırılması açısından da önemlidir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, GYFC’nin geopolimer sistemlerde kullanılmasının dayanıklılık, düşük geçirgenlik ve yüksek nihai dayanım açısından avantajlar sağladığını

göstermektedir (El Miski vd., 2025). Özellikle alkali aktivatörlerle birlikte kullanıldığında mühendislik açısından olumlu özellikler sergilemektedir. Bu özellikleri sayesinde GYFC hem geleneksel hem de yeni nesil bağlayıcı sistemler için stratejik bir hammadde olarak, sürdürülebilir bir alternatif oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'ndan (Erdemir) temin edilen öğütülmüş GYFC bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Erdemir GYFC özgül ağırlığı yaklaşık 2,9 olarak kabul edilmektedir. Tablo 2.3'te GYFC kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

**Tablo 2.3.** GYFC Kimyasal Kompozisyonu

| Bileşen                        | %        |
|--------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 38-45    |
| CaO                            | 26-38    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13-19    |
| MgO                            | 5-10     |
| FeO                            | 1.0 max. |
| S                              | 1.5 max. |
| K <sub>2</sub> O               | 2.0 max. |
| MnO                            | 2.5 max. |

#### 2.1.4. Alkali Aktivatörler

Geopolimer bağlayıcı sistemlerin oluşumunda en kritik bileşenlerden biri alkali aktivatörlerdir. Alkali aktivatörler, yüksek oranda amorf silis ve alümina içeren hammaddelerin çözünmesini sağlayarak reaksiyonları başlatır ve üç boyutlu aluminosilikat ağ yapısının gelişimine aracılık eder. Bu sayede geopolimerleşme süreci gerçekleşir ve bağlayıcı özellik kazandıran N-A-S-H veya C-A-S-H benzeri jeller oluşur (Davidovits, 2013).

Alkali aktivatörler genellikle iki ana grupta değerlendirilir:

Alkali hidroksit çözeltileri: En yaygın kullanılanlar sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) çözeltileridir. Bu çözeltiler, hammadde yüzeyinden Al ve Si iyonlarının çözünmesini kolaylaştırarak polimerleşme için gerekli monomer birimlerini sağlar. Konsantrasyon genellikle %8–16 molar aralığında tercih edilmektedir. Ancak yüksek molarite, karışımda hızlı priz, yüksek viskozite ve işlenebilirlik sorunlarına yol açabilir (Provis ve van Deventer, 2014).

Alkali silikat çözeltileri: Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) veya potasyum silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) çözeltileri, geopolimerleşme sürecinde yalnızca iyon çözünmesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sistemde ek silis kaynağı sağlar. Bu katkı, oluşan jel yapısının yoğunlaşmasına ve dayanımın artmasına katkıda bulunur. Silikat çözeltileri, hidroksitlerle birlikte “çift aktivatör” sistemi şeklinde sıklıkla kullanılmaktadır (Turner ve Collins, 2013).

Alkali aktivatörlerin oranı ve türü, geopolimerlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde belirleyici etkiye sahiptir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı genellikle 1,0–2,5 aralığında seçilmekte olup, optimum değerler kullanılan hammaddeye ve kür koşullarına göre değişmektedir. Daha yüksek silikat oranları genellikle daha yoğun mikro yapı ve daha yüksek basınç dayanımı sağlamaktadır (El Miski ve ark., 2025).

Alkali aktivatörlerin seçiminde ekonomik ve çevresel faktörler de önemli rol oynamaktadır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ticari olarak yaygın bulunabilir olmakla birlikte, üretim süreçleri enerji yoğundur ve karbon ayak izine katkıda bulunur. Bu nedenle son yıllarda alternatif düşük maliyetli aktivatörler (ör. sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), endüstriyel yan ürünlerden elde edilen alkali çözeltiler) üzerine çalışmalar artmıştır. Sodyum karbonat, daha düşük alkaliniteye sahip olmasına rağmen özellikle düşük sıcaklıklı kür koşullarında ekonomik ve sürdürülebilir bir çözüm sunabilmektedir (Montes-Hernandez, 2025).

Sonuç olarak, alkali aktivatörlerin türü, molaritesi ve karışım oranı geopolimer harçların hem mekanik özelliklerini hem de mikro yapısal gelişimini doğrudan etkilemektedir. Uygun aktivatör tasarımı ile diatomit ve GYFC gibi hammaddelerin etkinliği artırılabilir ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir bağlayıcı sistemler geliştirilebilir. Bu çalışmada kullanılan alkali aktivatörler DETSAN Kimya’dan temin edilmiştir. NaOH %98 saflık değerine sahip ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ise %99 saflık, 1,4 özgül ağırlık değerlerine sahiptir. Elde edilen bu alkali çözeltiler karışımların hazırlanmasında kullanılmıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisinin yaklaşık %64’ü su ( $\text{H}_2\text{O}$ ) iken, %36’sı katı maddelerden oluşmaktadır.

## **2.2. Yöntemler**

### **2.2.1. Geopolimer Harç Serilerinin Üretim Süreci**

Harç serilerinin oluşturulması için literatür taraması ile bu alanda yapılmış önceki çalışmalar incelenerek daha önce kullanılan karışım oranlarından faydalanılmış ve referans bir reçete oluşturulmuştur. Karıştırma işlemi tamamlanan harçların işlenebilirlikleri, TS EN 1015-3 Standardı’na uygun olarak yapılan Yayılma Tablası Deneyi ile kontrol edilmiştir. Elde edilen yayılma değerleri sonuçlarına göre optimum karışım oranlarına karar verilmiştir.



**Şekil 2.5.** Laboratuvarda Harç Serisi Üretimi

Şekil 2.5 'te paylaşılan görselde numunelerin laboratuvarda hazırlanma süreci sunulmuş olup kontrol harç serisi, agrega olarak CEN standart kum kullanılarak hazırlanmıştır. Diyatomit agregalarla hazırlanan geopolimer harç serilerinde ise standart kumun yerine, AD ve PD kuma göre düşük özgül ağırlığından dolayı hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir.

Bağlayıcı olarak, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltileri ile aktive edilmiş öğütülmüş GYFC kullanılmıştır. Başlangıç numunesi olan Kontrol serisinde agrega/bağlayıcı oranı 2,0 olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan NaOH çözeltisi, musluk suyu ile hazırlanmış ve 10 M molariteye ayarlanmıştır. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisi ticari olarak temin edilmiş, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı tüm serilerde 2,0 olarak sabitlenmiştir. Aktivatör çözeltilerin içeriğindeki suyun dışında su eklenmemiştir. Tüm serilerde su/bağlayıcı oranı 0,42 olarak sabit tutulmuştur. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Geopolimer harç serilerinin isimlendirilmesinde kullanılan 'K' indeksi standart kum ile üretilmiş kontrol harç serisini ifade etmektedir. 'AD' indeksi ise Afyon Diyatomit agregalı harç serilerini ifade eder. AD' yi belirtirken kullanılan sayısal değerler malzemenin toplam kum hacmi içindeki hacimsel yüzdesini temsil eder. Örneğin, AD10 tanımı, toplam kum hacminin %10' una eşdeğer bir miktarın AD ile değiştirildiği bir geopolimer harç karışımını ifade eder. 'PD' indeksi ise Polatlı Diyatomit agregalı harç serilerini ifade eder. AD serisinde olduğu gibi PD' yi belirtirken kullanılan sayısal değerler de malzemenin toplam kum hacmi içindeki hacimsel yüzdesini temsil eder. Hazırlanan geopolimer harçlar titreşim cihazı kullanılarak 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Taze numuneler, ilk 24 saat boyunca 20 ± 2 °C sıcaklıktaki laboratuvar koşullarında kalıplarında bekletilmiştir. Ertesi gün kalıplardan çıkarılan numuneler, deney gününe kadar 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve %50 ± 5 bağıl nem koşullarında ortam küründe bırakılmıştır. Şekil 2.6. numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonra bulunduğu ortam kürünü göstermektedir.



**Şekil 2.6.** Numunelerin Kür Süreci

Geopolimer harç serilerinin karışım özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir. Buna göre, GYFC, alkali çözelti miktarları ve su/bağlayıcı oranı sabit tutularak, kum ve diyatomit miktarları değiştirilerek geopolimer harç serileri oluşturulmuştur.

**Tablo 2.4.** Geopolimer Harç Serileri Karışım Tablosu (1 m<sup>3</sup>)

| Numune Adı | NaOH (M) | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg) | GYFC (kg) | Diyatomit (kg) | Kum (kg) | Su/Bağlayıcı |
|------------|----------|---------------------------------------|-----------|----------------|----------|--------------|
| K          | 10       | 170                                   | 700       | 0              | 1400     | 0,42         |
| AD10       | 10       | 170                                   | 700       | 91             | 1050     | 0,42         |
| AD20       | 10       | 170                                   | 700       | 183            | 700      | 0,42         |
| AD30       | 10       | 170                                   | 700       | 274            | 350      | 0,42         |
| PD10       | 10       | 170                                   | 700       | 101            | 1050     | 0,42         |
| PD20       | 10       | 170                                   | 700       | 201            | 700      | 0,42         |
| PD30       | 10       | 170                                   | 700       | 302            | 350      | 0,42         |

### 2.2.2. Yayılma Tablası Deneyi

Geopolimer harçların işlenebilirliğini belirlemek amacıyla Yayılma Tablası Deneyi, TS EN 1015-3 Standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde, taze harçların akışkanlık özellikleri değerlendirilmiş ve kalıplara yerleştirilebilirlik düzeyi hakkında bilgi elde edilmiştir. (TS EN 1015-3, 2016). Deneyin uygulamasında, standart yayılma tablası üzerine yerleştirilen metal koni (60 mm taban çapı, 70 mm üst çapı, 60 mm yükseklik) Metal koni, üç tabakada doldurulmuş ve her tabaka yerleştirildikten sonra yaklaşık 10 kez çelik çubuk ile şişlenerek sıkıştırılmıştır. Koninin doldurulmasının ardından yüzey fazlalıkları sıyrılmış ve koni dikey olarak yukarıya doğru kaldırılmıştır. Ardından yayılma tablası 15 kez serbest düşme hareketine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda harç, koni biçiminden yayılma hareketi göstermiştir. Yayılma çapı, tablanın birbirine dik iki yönünde ölçülmüş ve ortalama değer alınmıştır. Bu

değer, harcın işlenebilirliğini ve akışkanlığını ortaya koymaktadır. Şekil 2.7’ da yayılma tablasının görseli paylaşılmıştır.



**Şekil 2.7.** Yayılma Tablası Deneyi

Elde edilen yayılma değerleri, farklı diyatomit ikame oranlarına sahip geopolimer harçların işlenebilirlik özelliklerini karşılaştırmak ve ikame oranlarına karar vermek amacıyla değerlendirilmiştir.

### **2.2.3. Birim Hacim Ağırlık Deneyi**

Geopolimer harç numunelerinin yoğunluk özelliklerini belirlemek amacıyla birim hacim ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Öncelikle numuneler hassas terazide tartılarak kütleleri belirlenmiş, ardından numunelerin geometrik boyutları esas alınarak hacimleri hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlık ( $\rho$ ) aşağıdaki formül yardımıyla elde edilmiştir:

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

Burada;

m = numunenin kütlesi (g),

V = numunenin hacmi (cm<sup>3</sup>) olarak ifade edilmektedir.

Elde edilen değerler, farklı diyatomit ikame oranlarına sahip geopolimer harçların yoğunluklarındaki değişimleri karşılaştırmak amacıyla değerlendirilmiştir.

### **2.2.4. Eğilme Dayanımı Deneyi**

Geopolimer harç numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranışını ortaya koymak amacıyla eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney prosedürü, TS EN 196-1 standardında belirtilen yöntem esas alınarak uygulanmış ve numuneler üzerinde üç nokta eğilme deneyi

gerçekleştirilmiştir. Elde edilen eğilme dayanımı değerleri, geopolimer harçların çekme gerilmelerine karşı direnç özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır (TS EN 196-1, 2016).

Deneyde Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında bulunan Liya marka cihaz kullanılmıştır ve Şekil 2.8' de görseli paylaşılmıştır.



**Şekil 2.8.** Beton Basınç-Eğilme Test Cihazı

Deneylerde, 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Kür süresini tamamlayan numuneler, eğilme testi cihazında iki destek üzerine yerleştirilmiş ve ortasından yük uygulanmıştır. Yük, cihaz tarafından, kırılma anına kadar 50 N/sn sabit hızla artırılmış, numune kırılma anındaki yük değeri hesaplarda kullanılmıştır. Şekil 2.9. eğilme dayanımı deneyinin görselini göstermektedir.



**Şekil 2.9.** Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı ( $\sigma_f$ ) aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\sigma_f = \frac{(1,5 * F * l)}{b^3} \quad (2.2)$$

Burada;

$F$  = kırılma anındaki maksimum yük (N),

$l$  = destekler arası mesafe (mm),

$b$  = numunenin kesit kenar uzunluğu (mm) olarak ifade edilmektedir.

### **2.2.5. Basınç Dayanımı Deneyi**

Geopolimer harç numunelerinin mekanik performansını belirlemek amacıyla basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, çimento esaslı harçların dayanım özelliklerinin belirlenmesine yönelik deney yöntemlerini tanımlayan TS EN 196-1 standardına uygun olarak uygulanmıştır. Şekil 2.10' da basınç dayanımı deneyinin görseli paylaşılmış olup daha önce eğilme dayanımı deneyine tabi tutularak kırılmış olan  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin yarım parçaları basınç dayanımı deneyinde kullanılmıştır. Her bir yarım prizma, standartta belirtilen yöntem doğrultusunda basınç deneyi numunesi olarak değerlendirilmiştir (TS EN 196-1, 2016).



**Şekil 2.10.** Basınç Dayanımı Deneyi

Deneyde Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında bulunan Liya marka eksenel yükleme cihazı kullanılmıştır.

Yük, cihaz tarafından  $2400 \pm 200$  N/s hızında artırılmış ve numune kırılana kadar uygulanmıştır. Deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri ( $F$ ) ortalamaları, numune kesit alanına ( $A_0$ ) bölünerek basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) hesaplanmıştır:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

Burada;

- $\sigma_c$  = Basınç dayanımı (MPa),
- $F$  = Kırılma anındaki maksimum yük (N),
- $A_0$  = Basınca maruz kalan yüzey alanı ( $\text{mm}^2$ ) olarak tanımlanmaktadır.

Basınç dayanımı değerleri, farklı diyatomit ikame oranlarına sahip geopolimer harçların mekanik performanslarının karşılaştırılması için kullanılmıştır.

### **2.2.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi**

Geopolimer harçların içyapısal bütünlüğünü ve homojenliğini değerlendirmek amacıyla ultrases geçiş hızı (UPV – Ultrasonic Pulse Velocity) deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem,

numune içerisinde geçen ultrases dalgalarının hızını ölçerek malzemenin yoğunluğu, gözenekliliği ve olası mikro çatlaklar hakkında dolaylı bilgi sağlamaktadır.



**Şekil 2.11.** Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Numuneler, 28 günlük ortam kürünün ardından  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarındaki prizmatik örnekler üzerinde test edilmiştir. Ölçümlerde, Controls marka ultrasonik geçiş hızı deney cihazının verici ve alıcı probları numunenin iki karşılıklı yüzeyine yerleştirilmiş; prob–numune temas yüzeylerinde ses dalgalarının iletimini düzenli kılmak amacıyla özel jel kullanılmıştır (TS EN 12504-4, 2012). Şekil 2.11. Ultrases geçiş hızı deneyini göstermektedir.

Cihaz tarafından ölçülen geçiş süresi ( $\mu\text{s}$ ), numunenin boyuna bölünerek ultrases geçiş hızı ( $V$ , km/s) hesaplanmıştır:

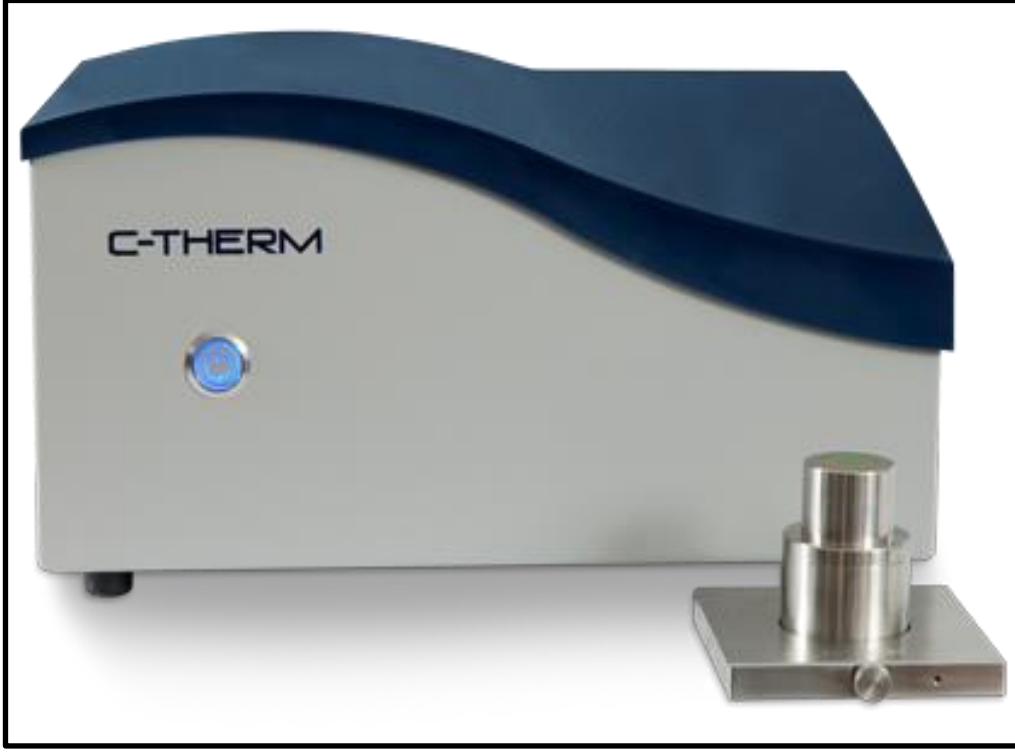
$$V = \frac{L}{t} \quad (2.4)$$

Burada;

$V$  = ultrases geçiş hızı (km/s),

$L$  = numune boyu (mm),

$t$  = dalganın geçiş süresi ( $\mu\text{s}$ ) olarak tanımlanmaktadır.



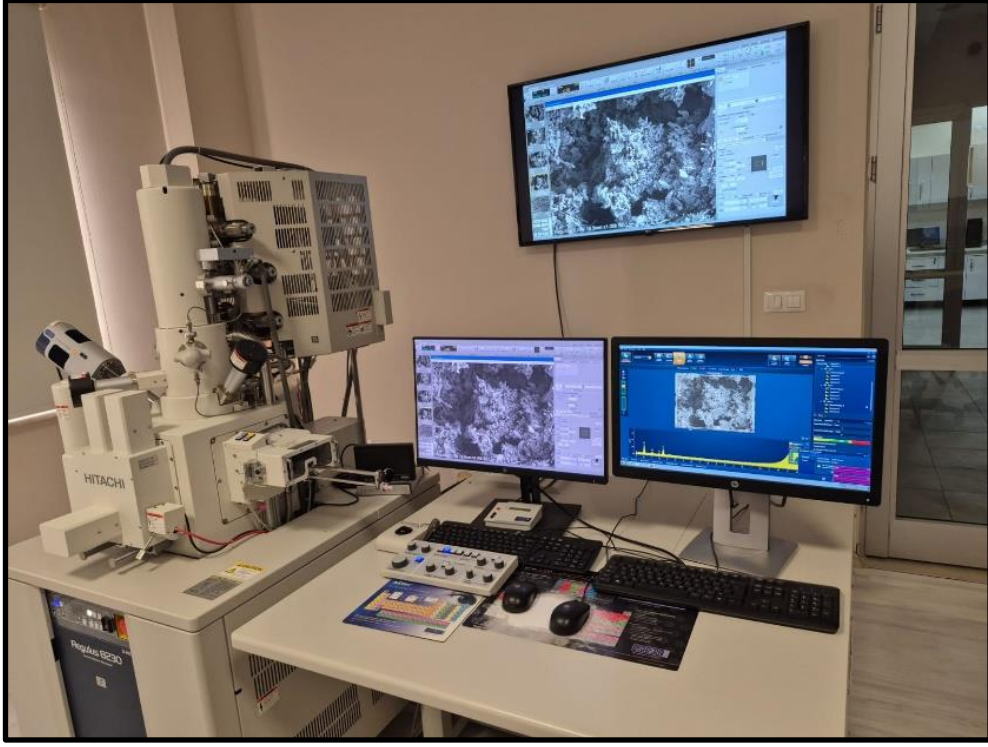
**Şekil 2.12.** TCi Ctherm Isıl İletkenlik Cihazı

### **2.2.7. Isıl İletkenlik Deneyi**

Her seriden 44 mm çapında 20 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiş ve her seriden üçer adet numune 28 günlük kür süresinin sonunda ısı iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur. Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜ-BİT) tarafından numuneler üzerinde TCi Ctherm cihazı ile Isıl İletkenlik Ölçümü (1-10W/m-K) <sup>1</sup> TCi Ctherm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.12. deney cihazının görselini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar bu çalışma kapsamında ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

### **2.2.8. Mikro Yapı Analizi**

Üretilen harç serilerinin yüzey morfolojisi Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile, elementel bileşimi ise Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ile belirlenmiştir. Görüntüleme ESOGÜ ARUM'da bulunan Hitachi Regulus 8230 model EDS cihazı entegreli FE-SEM cihazı ile yapılmıştır.



**Şekil 2.13.** ESOGÜ ARUM FE-SEM Cihazı

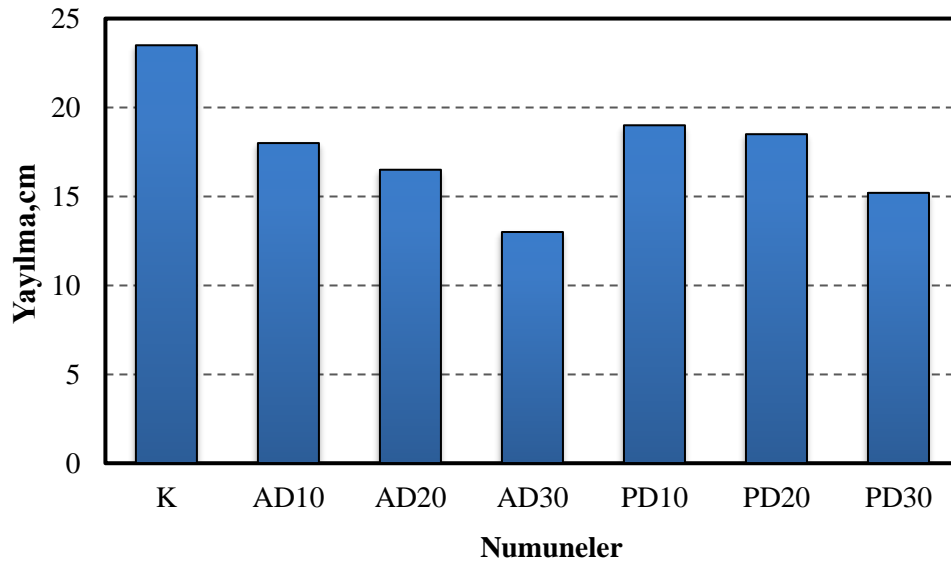
Şekil 2.13. ile deney cihazının görseli sunulmaktadır. SEM cihazında görüntüleme yapılabilmesi için örneklerin iletken olması veya iletkenliği sağlayacak kaplama yapılması gerekmektedir. Hazırlanan örnekler, Leica EM ACE600 kaplama cihazı ile 120 saniye altın/paladyum (Au/Pd) kaplanmıştır. Kimyasal kompozisyonun belirlenmesi için EDS dedektörü ile elementel haritalandırma yapılmıştır.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

#### 3.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Şekil 3.1’ de görüldüğü üzere kontrol serisi (K) en yüksek yayılma değerine (23,5 cm) ulaşmıştır. Bu durum, sadece CEN standart kum kullanılarak hazırlanan harcın, yüksek işlenebilirlik sergilediğini göstermektedir.

Diyatomit ikameli serilerde ise yayılma değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. AD kullanılan serilerde ikame oranı arttıkça işlenebilirlik düşmüştür. AD10 serisinde yayılma değeri 18 cm iken, AD20 serisinde 16,5 cm’ye ve AD30 serisinde 13 cm’ye gerilemiştir. Diyatomit ikameli serilerde yayılma değerleri, kontrol numunesine kıyasla oransal olarak değerlendirildiğinde işlenebilirlikte belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Kontrol numunesinde yayılma değeri 23,5 cm olarak ölçülürken, Afyonkarahisar diyatomiti kullanılan serilerde bu değerler sırasıyla AD10, AD20 ve AD30 numunelerinde yaklaşık %23,4, %29,8 ve %44,7 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Özellikle yüksek ikame oranında AD30 numunesinde işlenebilirlikteki düşüşün %45’e yaklaşması, Afyon diyatomitinin gözenekli yapısının ve yüksek su emme kapasitesinin karışımın reolojik davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Geopolimer Harç Serileri Yayılma Değerleri

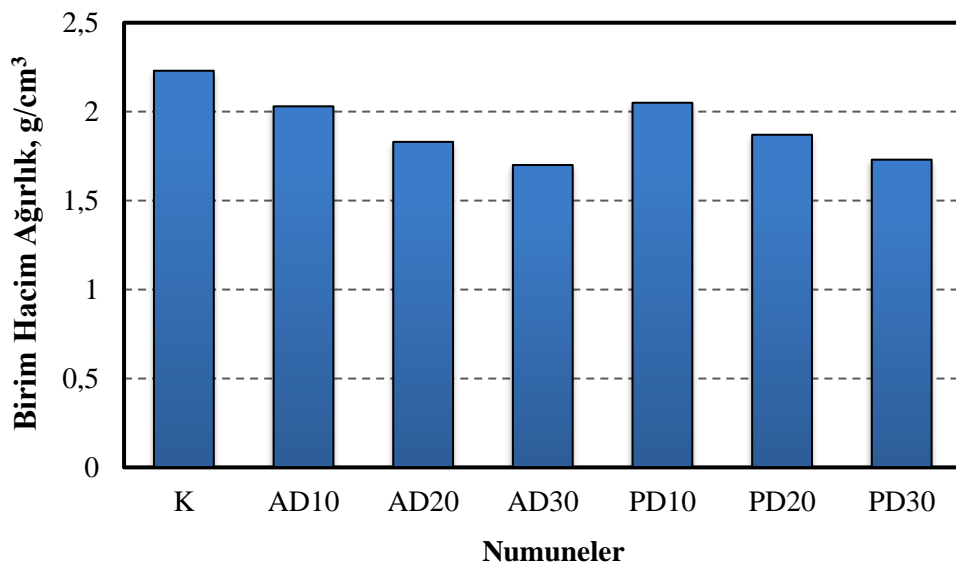
Polatlı diyatomiti kullanılan serilerde de benzer bir eğilim gözlenmiştir. PD10 serisinde yayılma değeri 19 cm, PD20 serisinde 18,5 cm ve PD30 serisinde 15,2 cm olarak ölçülmüştür.

Polatlı diyatomiti kullanılan serilerde kontrol numunesine göre yayılma değerlerindeki azalma daha sınırlı kalmıştır. PD10, PD20 ve PD30 numunelerinde yayılma değerlerinin kontrol numunesine kıyasla sırasıyla yaklaşık %19,1, %21,3 ve %35,3 oranlarında düşüş gösterdiği görülmüştür. Aynı ikame oranlarında karşılaştırma yapıldığında, PD serilerinde yayılma kaybının AD serilerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, Polatlı diyatomitinin Afyonkarahisar diyatomitine göre daha az gözenekli ve daha düşük su emme kapasitesinde olduğunu doğrular niteliktedir.

Genel olarak hem AD hem de PD serilerinde ikame oranının artmasıyla işlenebilirlik azalmaktadır. Ancak PD katkılı harçlar, aynı ikame oranlarında AD katkılı harçlara göre daha yüksek yayılma değerleri göstermiştir. Bu bulgu, farklı kaynaklardan elde edilen diyatomitlerin fiziksel özelliklerinin geopolimer harçların taze haldeki performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

### 3.2. Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları

Şekil 3.2’de geopolimer harç serilerine ait birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir. K serisinde birim hacim ağırlık  $2,23 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. Diyatomit ikameli serilerde ise birim hacim ağırlık değerlerinin kontrol serisine kıyasla azaldığı görülmektedir. Afyonkarahisar diyatomiti kullanılan serilerde birim hacim ağırlık değerleri AD10, AD20 ve AD30 numuneleri için sırasıyla  $2,03 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,83 \text{ g/cm}^3$  ve  $1,70 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Polatlı diyatomiti kullanılan serilerde ise PD10, PD20 ve PD30 numuneleri için birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla  $2,05 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,87 \text{ g/cm}^3$  ve  $1,73 \text{ g/cm}^3$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.2. Geopolimer Harç Serileri Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Elde edilen sonuçlar, farklı diyatomit ikame oranlarına sahip geopolimer harçların birim hacim ağırlıklarındaki değişimleri kontrol numunesine göre oransal olarak ortaya koymaktadır. Kontrol numunesinde birim hacim ağırlık  $2,23 \text{ g/cm}^3$  olarak belirlenirken, Afyonkarahisar diyatomiti kullanılan serilerde bu değerle sırasıyla AD10, AD20 ve AD30 numunelerinde yaklaşık %9,0, %18,0 ve %23,8 oranlarında azaldığı görülmüştür. Özellikle yüksek ikame oranında (AD30) birim hacim ağırlıktaki azalmanın %24'e yaklaşması, Afyon diyatomitinin gözenekli yapısının ve düşük özgül ağırlığının karışım yoğunluğu üzerinde belirgin bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

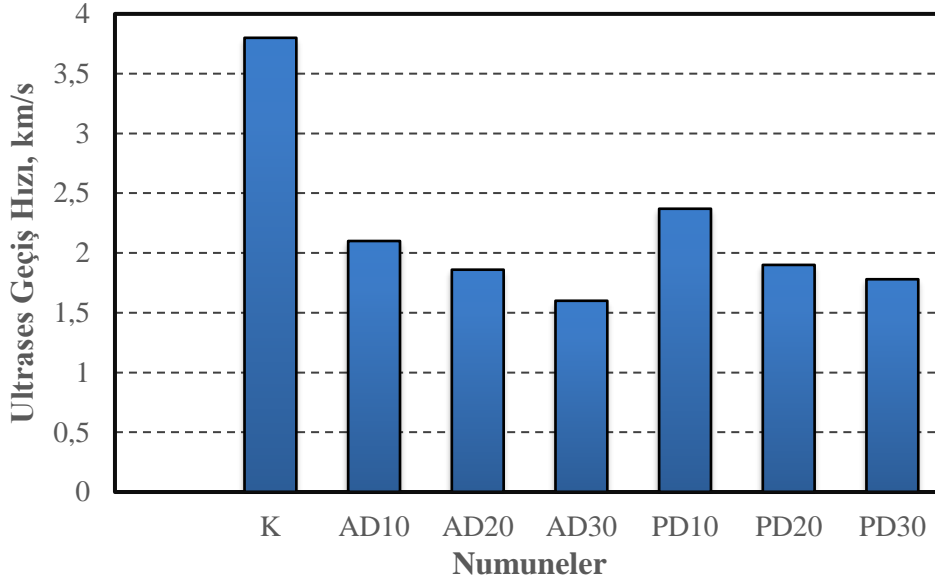
Polatlı diyatomiti kullanılan serilerde ise kontrol numunesine göre birim hacim ağırlık değerlerindeki azalma daha sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir. PD10, PD20 ve PD30 numunelerinde birim hacim ağırlık değerlerinin kontrol numunesine kıyasla sırasıyla yaklaşık %8,1, %16,1 ve %22,4 oranlarında düştüğü tespit edilmiştir. Aynı ikame oranlarında karşılaştırma yapıldığında, PD serilerindeki yoğunluk azalmasının AD serilerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, Polatlı diyatomitinin Afyonkarahisar diyatomitine kıyasla daha düşük poroziteye ve daha kompakt bir yapıya sahip olduğunu düşündürmektedir.

Diyatomit, düşük özgül ağırlığa ve yüksek gözenekliliğe sahip bir malzeme olduğundan, ikame oranının artmasıyla birlikte harçların birim hacim ağırlığında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum, literatürde gözenekli ve hafif agregaların bağlayıcı matris içerisinde daha düşük yoğunluklu ve daha heterojen bir yapı oluşturduğunu ortaya koyan bulgularla uyumludur (Neville, 2011; Mindess vd., 2003).

Elde edilen bu sonuçlar, diyatomit kaynaklarının fiziksel özelliklerindeki farklılıkların geopolimer harçların hafiflik karakteri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymakla birlikte diyatomit katkılı geopolimer harçların hafif yapı malzemesi olarak kullanım potansiyelini güçlü biçimde desteklemektedir.

### **3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları**

Elde edilen değerler, diyatomit katkısının farklı oranlarda kullanıldığı geopolimer harçların homojenliğini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Genel olarak, yüksek ultrases geçiş hızı değerleri daha yoğun ve homojen bir içyapıya işaret ederken, düşük hız değerleri gözeneklilik, mikro çatlak veya zayıf bağ yapısının göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



**Şekil 3.3.** Geopolimer Harç Serileri Ultrases Geçiş Hızı Değerleri

Şekil 3.3'e göre, K serisi 3,8 km/s hız ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu durum, yalnızca CEN standart kumu kullanılan kontrol harcının daha yoğun ve homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

AD katkılı serilerde ultrases geçiş hızları, aynı oranlardaki PD katkılı serilerden daha düşük çıkmıştır. Örneğin AD10 serisinin UPV değeri 2,10 km/s iken, PD10 serisi 2,37 km/s olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde AD20 serisi 1,86 km/s, PD20 serisi 1,90 km/s; AD30 serisi ise 1,60 km/s, PD30 serisi 1,78 km/s değerine sahiptir. Bu sonuçlar, AD katkılı harçların PD katkılılara göre daha boşluklu ve gözenekli bir içyapı geliştirdiğini doğrulamaktadır. Her iki diyatomit türünde de ikame oranı arttıkça ultrases geçiş hızında belirgin bir azalma gözlenirse de genel anlamda, AD katkılı seriler PD katkılılara göre daha düşük UPV değerleri ile karakterize edilmiştir.

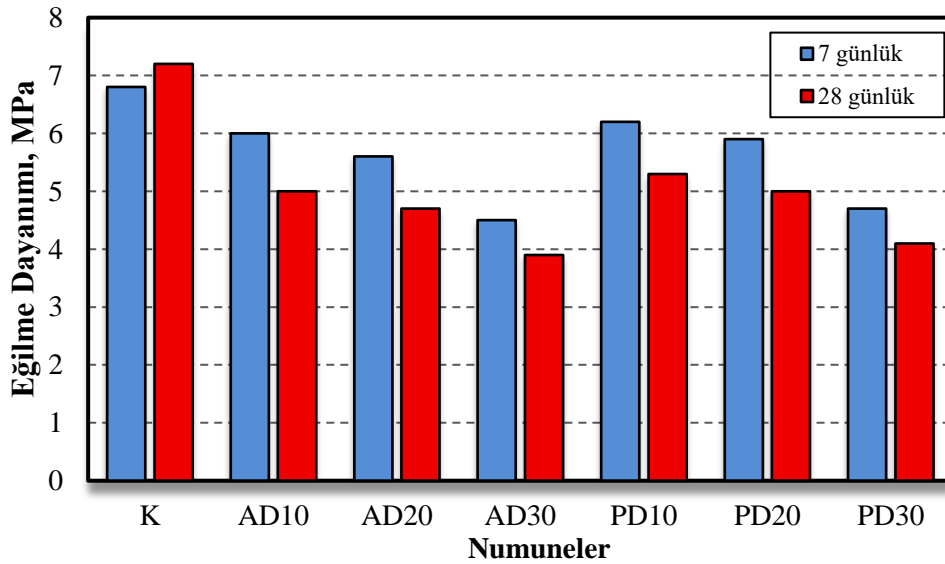
Bu sonuçlar, diyatomit ikame oranının artmasıyla birlikte içyapıda boşluk hacminin arttığını ve bağlayıcı matrisin sürekliliğinin zayıfladığını göstermektedir. AD serilerinde UPV değerlerinin daha düşük olması, Afyonkarahisar diyatomitinin Polatlı diyatomitine kıyasla daha yüksek porozite ve su emme kapasitesine sahip olduğunu destekler niteliktedir. Bu durum, birim hacim ağırlık sonuçlarıyla da uyumludur. Nitekim diyatomit ikamesiyle birlikte birim hacim ağırlık değerlerinin azalması, içyapıdaki boşluk oranının arttığını ve malzemenin daha hafif ve daha heterojen bir karakter kazandığını ortaya koymaktadır.

UPV sonuçları aynı zamanda işlenebilirlik verileriyle de paralellik göstermektedir. Diyatomitin yüksek su emme kapasitesi ve geniş özgül yüzey alanı, karışımın akıcılığını azaltmış ve yayılma değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Azalan işlenebilirlik, karışımın kalıp içerisinde yeterince yerleşmemesine ve sıkışma sırasında mikro boşlukların oluşmasına yol açmıştır. Bu durum, sertleşmiş halde daha yüksek gözeneklilik ve daha düşük UPV değerleri ile sonuçlanmıştır. Dolayısıyla UPV değerlerindeki azalma, yalnızca malzeme bileşiminin değil, aynı zamanda yerleşme ve sıkışma koşullarının da bir sonucu olarak da değerlendirilebilir.

Elde edilen bulgular, UPV, birim hacim ağırlık ve işlenebilirlik sonuçlarının birbirini tamamlayan parametreler olduğunu ve diyatomit katkılı geopolimer harçlarda performansın çok parametrelili bir yapı tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır.

### 3.4. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Eğilme dayanımı sonuçlarına göre oluşturulmuş Şekil 3.4’ de yer alan değerler incelendiğinde, K serisi hem 7 günlük (8,4 MPa) hem de 28 günlük (8,8 MPa) ölçümlerde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, yalnızca CEN standart kumu kullanılan kontrol serisinin geopolimer harçlarda en iyi eğilme dayanımı performansını sergilediğini göstermektedir.



Şekil 3.4. Geopolimer Harç Serileri Eğilme Dayanımı Değerleri

AD katkılı serilerde, ikame oranı arttıkça eğilme dayanımında belirgin bir düşüş gözlenmiştir. AD10 serisinde 7 günlük dayanım 6,0 MPa iken, AD30 serisinde bu değer 4,5 MPa'a kadar azalmıştır. Benzer şekilde 28 günlük sonuçlarda AD10 serisi 5,0 MPa, AD30 serisi ise yalnızca 3,9 MPa değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, Afyonkarahisar diyatomitinin gözenekli yapısı ve yüksek su emme kapasitesi nedeniyle matris bütünlüğünü zayıflattığını göstermektedir.

PD katkılı serilerde ise AD serilerine kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. PD10 serisi 7 günlük kür yaşında 6,2 MPa, 28 günlük kür yaşında ise 5,3 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. PD20 serisinde 28 günlük eğilme dayanımı 5,0 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak PD30 serisinde dayanım değerlerinin 7 günlükte 4,7 MPa ve 28 günlükte 4,1 MPa seviyelerine gerilediği görülmüştür. Bu eğilim, yüksek ikame oranlarının her iki diyatomit türünde de mekanik performansı olumsuz etkilediğini; ancak Polatlı diyatomitinin Afyonkarahisar diyatomitine kıyasla daha iyi eğilme dayanımı performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Eğilme dayanımı sonuçları kontrol serisine göre oransal olarak değerlendirildiğinde, diyatomit ikamesinin her iki kür yaşında da dayanımı belirgin biçimde düşürdüğü görülmektedir. Yedi günlük sonuçlarda kontrol numunesine kıyasla AD10 serisinde yaklaşık %28,6, PD10 serisinde ise yaklaşık %26,2 oranında düşüş meydana gelmiştir. Yüksek ikame oranlarında kayıpların daha keskin hale geldiği; AD30 serisinde dayanımın kontrol serisine göre yaklaşık %46,4, PD30 serisinde ise %44,0 oranında azaldığı belirlenmiştir. Yirmi sekiz günlük sonuçlarda ise AD10 serisinde düşüş yaklaşık %43,2 iken AD30 serisinde bu oran %55,7'ye yükselmiştir. Polatlı diyatomiti kullanılan serilerde ise aynı ikame oranlarında PD10: %39,8; PD20: %43,2; PD30: %53,4 şeklinde daha düşük kayıplar elde edilmiştir.

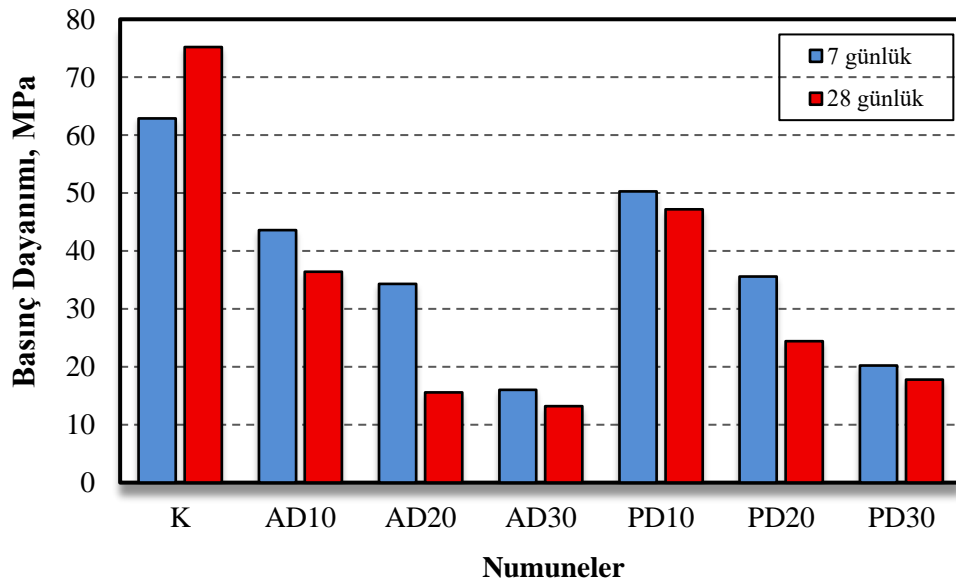
Diyatomit ikamesiyle geopolimer harçlarda gözlenen birim hacim ağırlık, işlenebilirlik ve eğilme dayanımı değişimleri, birbirine bağlı bir mikroyapısal dönüşüm sürecinin sonucu olarak değerlendirilebilir. Diyatomitin yüksek su emme kapasitesi ve geniş özgül yüzey alanı, karışım içerisindeki serbest suyun bir kısmının agregalar tarafından absorbe edilmesine yol açmış; bu durum yayılma değerlerinde belirgin bir düşüşle sonuçlanmıştır. Geopolimer sistemlerde alkalın ortamın sürekliliği ve çözünmüş silis-alümina miktarı, jel oluşumu açısından kritik öneme sahiptir. Diyatomitin suyu bünyesinde tutması, N-A-S-H ve C-(A)-S-H jel oluşumunu sınırlandırarak bağlayıcı fazın sürekliliğini zayıflatmıştır (Davidovits, 2013; Provis & van Deventer, 2014).

Taze halde gözlenen bu olumsuzluklar, sertleşmiş halde mikroyapısal zayıflıklar olarak ortaya çıkmıştır. Artan porozite ve heterojen yapı, özellikle agrega-matris ara yüzey bölgesinde süreksizliklerin oluşmasına neden olmuş; bu durum çatlak ilerlemesini kolaylaştırarak eğilme dayanımında belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Literatürde, eğilme dayanımının boşluklu yapılara ve zayıf ara yüzey bölgelerine basınç dayanımına kıyasla daha duyarlı olduğu belirtilmektedir (Provis, 2018).

Bu bağlamda, diyatomit ikamesiyle geopolimer harçlarda gözlenen yoğunluk azalması → işlenebilirlik kaybı → mikro yapı süreksizliği → eğilme dayanımı düşüşü şeklinde bir nedensel zincir ortaya çıkmıştır. AD serilerinde bu etkinin daha belirgin olması, söz konusu diyatomitin PD'ye kıyasla daha yüksek porozite ve su emme kapasitesine sahip olmasıyla açıklanabilir. Nitekim farklı diyatomit kaynaklarının geopolimer sistemlerde farklı performanslar sergilediği literatürde de rapor edilmiştir (Turner ve Collins, 2013; Ferreira vd., 2024).

### 3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Şekil 3.5. Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, K serisi 7 günlük ölçümde 62,9 MPa, 28 günlük ölçümde ise 75,2 MPa basınç dayanımına ulaşarak yine en yüksek sonucu vermektedir. Bu sonuç, yalnızca CEN standart kumu kullanılarak hazırlanan K numunesinin geopolimer bağlayıcı ile yüksek mekanik performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 3.5. Geopolimer Harç Serileri Basınç Dayanımı Değerleri

AD katkılı serilerde basınç dayanımının, ikame oranı arttıkça düzenli bir biçimde azaldığı tespit edilmiştir. AD10 serisi 7 günlük kür sonunda 43,6 MPa değerine ulaşırken, AD30 serisinde bu değer yalnızca 16 MPa olarak ölçülmüştür. Benzer düşüş 28 günlük sonuçlarda da gözlenmiş, AD10 serisi 36,4 MPa basınç dayanımı sergilerken, AD30 serisinin dayanımı 13,2 MPa seviyesine gerilemiştir. Bu eğilim, Afyonkarahisar diyatomitinin gözenekli ve düşük yoğunluklu yapısının mekanik dayanımı olumsuz etkilediğini göstermektedir.

PD katkılı karışımlar ise AD serilerine kıyasla daha yüksek dayanım değerleri ortaya koymuştur. PD10 serisi 7 günlük kür sonunda 50,3 MPa, 28 günlük kürde ise 47,2 MPa olarak ölçülmüştür. PD20 ve PD30 serilerinde dayanımda azalma gözlenirse de, aynı oranlardaki AD serilerine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Örneğin, PD30 serisinin 28 günlük basınç dayanımı 17,8 MPa iken, AD30 serisi 13,2 MPa değerinde kalmıştır. Bu farkın, Polatlı diyatomitinin mineral içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Genel bir değerlendirmede, her iki diyatomit türünde de ikame oranı arttıkça basınç dayanımı azalmış; ancak PD, AD' ye göre daha yüksek mekanik performans sağlamıştır. Buna rağmen, hiçbir ikame oranı K serisinin dayanımına yaklaşamamıştır.

Buna ek olarak, diyatomit agregalarının oluşturduğu gözenekli içyapı, erken yaşlarda bağlayıcı matris içerisinde alkali aktivasyon ürünlerinin daha hızlı oluşmasına olanak tanıyarak nispeten daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesine katkı sağlamış olabilir. Ancak alkali aktive edilmiş ve silika açısından zengin sistemlerde, zaman ilerledikçe jel fazlarının yeniden düzenlenmesi ve içyapının dengeye ulaşma süreci, dayanım gelişim hızında sınırlı bir azalmaya veya dalgalanmaya neden olabilmektedir. Bu durum, gözeneklilik ile dayanım arasındaki ilişkinin zamana bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğini ve hafif agregalı sistemlerde klasik çimentolu betonlardan farklı bir dayanım kinetiğinin söz konusu olduğunu göstermektedir. Literatürde hafif betonlar ve hafif agregalı alkali aktive edilmiş sistemler için benzer erken yaş dayanım avantajı ve ilerleyen yaşlarda farklı gelişim eğilimleri rapor edilmiştir (Mindess ve ark., 2003: 181–189; Wongkeo ve ark., 2014: 655–661). Bu bağlamda, bu çalışmada gözlenen dayanım değişimi sistemin zayıflığından ziyade, hafiflik, gözeneklilik ve jel fazlarının zamana bağlı evrimi ile ilişkili doğal bir davranış olarak değerlendirilmelidir.

Basınç dayanımı sonuçları, diyatomit ikamesinin geopolimer harçların hem taze hem de sertleşmiş hal özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Diyatomit katkısı ile birlikte birim hacim ağırlık değerlerinde azalma, yayılma değerlerinde düşüş ve ultrasonik geçiş hızında (UPV) azalma eğilimi gözlenmiş; bu değişimler basınç dayanımı sonuçlarıyla doğrudan ilişkili bir yapı sergilemiştir. Bu durum, hafif ve gözenekli agregaların

bağlayıcı matris içerisinde daha heterojen bir mikro yapı oluşturduğunu ve mekanik performansı sınırladığını ortaya koymaktadır (Neville, 2011; Mindess vd., 2003).

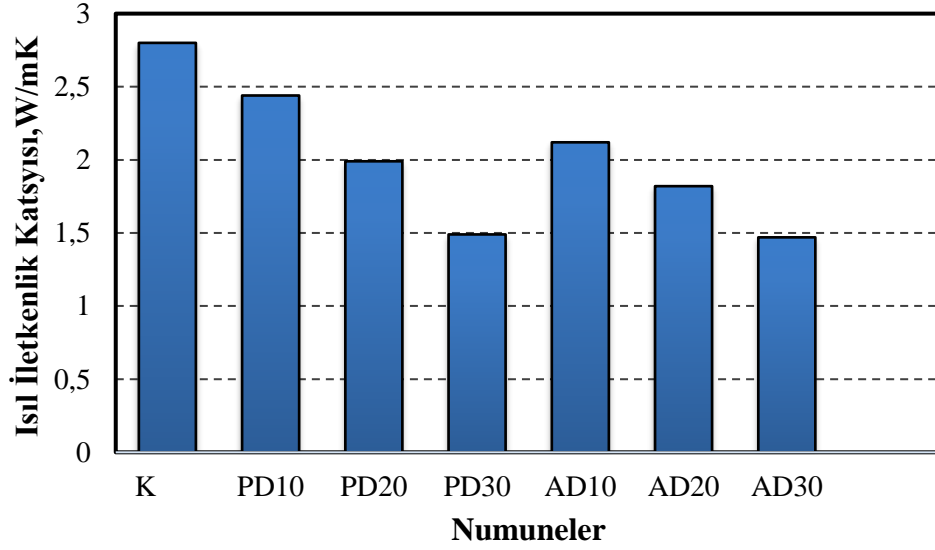
Diyatomitin düşük özgül ağırlığı ve yüksek porozitesi, harçların birim hacim ağırlığını azaltarak hafiflik avantajı sağlamıştır. Ancak aynı özellikler, matris içinde boşluk oranını artırarak yoğun ve sürekli bir bağlayıcı yapı oluşumunu zorlaştırmıştır. Bu durum, UPV değerlerinin düşmesiyle de desteklenmektedir. Ultrasonik geçiş hızının azalması, içyapıda artan boşlukluluk ve süreksizliklerin göstergesi olarak kabul edilmekte olup, literatürde UPV ile mekanik dayanım arasında güçlü bir korelasyon bulunduğu ifade edilmektedir (Malhotra ve Carino, 2004).

Bu bağlamda, diyatomit ikamesiyle geopolimer harçlarda gözlenen basınç dayanımı kaybı; hafiflik artışı → işlenebilirlik azalması → yerleşme zorluğu → artan porozite → UPV düşüşü → mekanik dayanım kaybı şeklinde bir nedensel zincirle açıklanabilir. AD kullanılan serilerde bu etkinin daha belirgin olması, söz konusu diyatomitin PD' ye kıyasla daha yüksek porozite ve su emme kapasitesine sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir. Buna karşılık, PD kullanılan serilerde daha kompakt bir yapı oluşmuş ve bu durum daha yüksek UPV ve basınç dayanımı değerleriyle kendini göstermiştir.

Sonuç olarak, diyatomit ikamesi geopolimer harçlarda hafiflik avantajı sağlarken, işlenebilirlik, yoğunluk ve içyapı sürekliliğinde meydana gelen değişimler nedeniyle mekanik dayanım üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturmuştur. Bu bulgular, diyatomit katkısının geopolimer sistemlerde optimum bir ikame oranı çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini ve hafiflik–dayanım dengesinin tasarım aşamasında dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

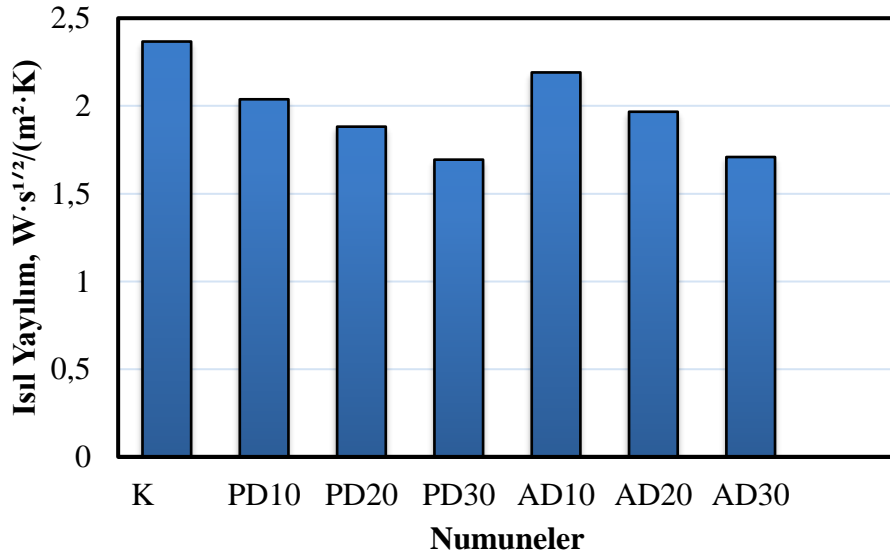
### **3.6. Isıl İletkenlik Deney Sonuçları**

Yapılan ısı iletkenlik ölçümleri sonucunda, katkı oranının artmasıyla birlikte tüm numunelerde ısı iletkenlik katsayısının düzenli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 3.6. Isı iletkenlik ölçümleri incelendiğinde kontrol numunesinde ortalama 2,82 W/mK olan ısı iletkenliği değeri, %30 katkılı PD30 ve AD30 numunelerinde sırasıyla 1,49 W/mK ve 1,47 W/mK seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum, diyatomit katkısının gözenekli yapısı sayesinde ısı transferini sınırlandırdığını ve geopolimer harçların ısı yalıtım performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. En düşük ısı iletkenliği değeri AD30 numunesinde elde edilmiş olup, bu numune enerji verimli yapı elemanları açısından en avantajlı karışım olarak değerlendirilmiştir.



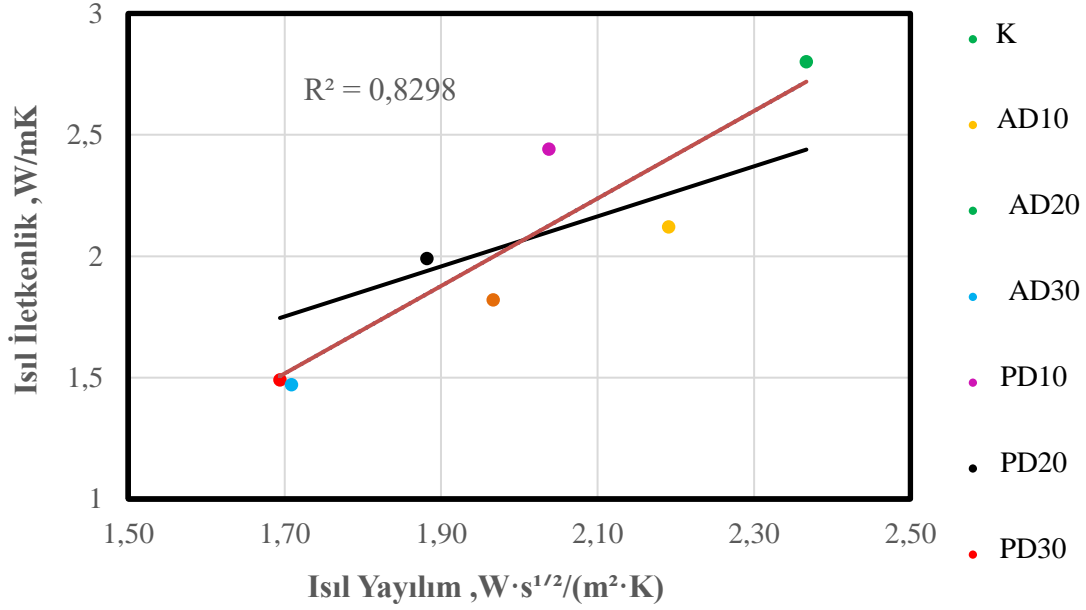
**Şekil 3.6.** Geopolimer Harç Serileri Ortalama Isı İletkenlik Değerleri

Bununla birlikte Şekil 3.7. Isıl yayılım ölçümleri incelendiğinde, kontrol numunesi için ortalama  $2,367 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  olan değer, katkı oranının artmasıyla birlikte hem AD hem de PD serilerinde düzenli olarak azaldığı görülmüştür. AD30 ve PD30 numunelerinde sırasıyla  $1,694$  ve  $1,709 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ortalama ısıl yayılım değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 3.7.** Geopolimer Harç Serileri Isıl Yayılım Değerleri

Bu sonuçlar, yüksek oranlı katkı kullanımının malzemenin yüzey ısı iletim hızını azalttığını ve ısı yalıtım performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Bu şu anlama gelir; diyatomit katkılı numuneler ısıyı daha yavaş alıp verir ve dolayısıyla ısıl konforu artırır.



**Şekil 3.8.** Isıl Yayılım ile Isıl İletkenlik Arasındaki İlişki

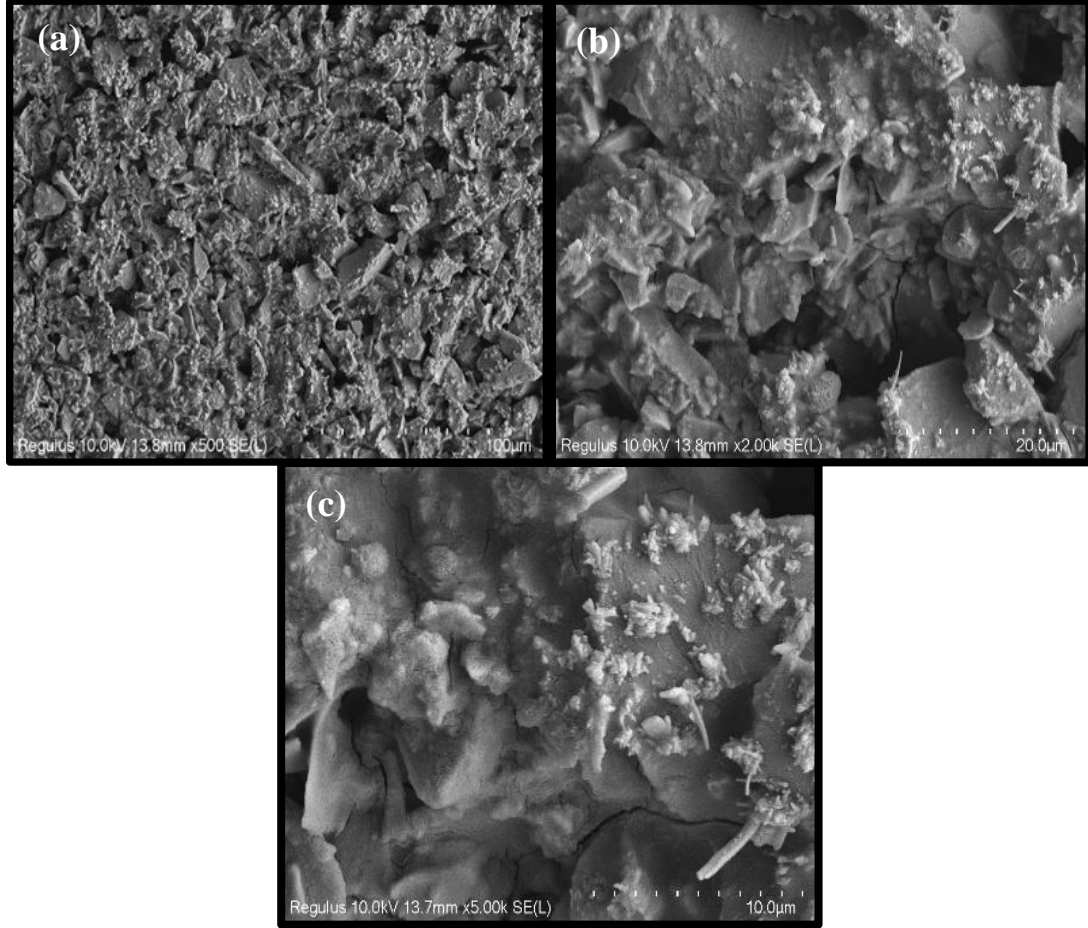
Şekil 3.8. Isıl yayılım ile ısı iletkenlik arasındaki ilişkiyi göstermekte olup bu ilişki doğrusal regresyon analizi ile incelenmiş ve iki parametre arasında çok güçlü bir pozitif korelasyon olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, diyatomit ikame oranının artmasıyla birlikte karışımların yoğunluk ve mikro yapı özelliklerinde meydana gelen değişimlerin ısı davranışı doğrudan etkilediğini göstermektedir. Nitekim diyatomit katkısı ile birim hacim ağırlık değerlerinin azalması, içyapıda gözenekliliğin artmasına ve daha hafif bir matris oluşmasına yol açmıştır. Yoğunluğun azalmasıyla birlikte hem yüzey ısı yayılım hızının (efüzyon) hem de toplam ısı iletim kapasitesinin (ısı iletkenlik) eş zamanlı olarak düştüğü belirlenmiştir.

Özellikle AD30 ve PD30 numuneleri, en düşük birim hacim ağırlık değerlerine sahip olmalarıyla uyumlu şekilde, düşük ısı yayılım ve düşük ısı iletkenlik değerleri sergilemiş ve en yüksek ısı yalıtım performansını ortaya koymuştur. Bu bulgu, geopolimer harçlarda yoğunluk–porozite–ısı iletim özellikleri arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu ve diyatomit ikamesinin hafiflik ile ısı performans arasında doğrudan bir bağlantı oluşturduğunu göstermektedir.

### 3.7. Mikro Yapı Analiz Sonuçları

Farklı oranlarda katkı içeren geopolimer harç numunelerinin mikro yapısal özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak incelenmiş ve elde edilen görüntüler

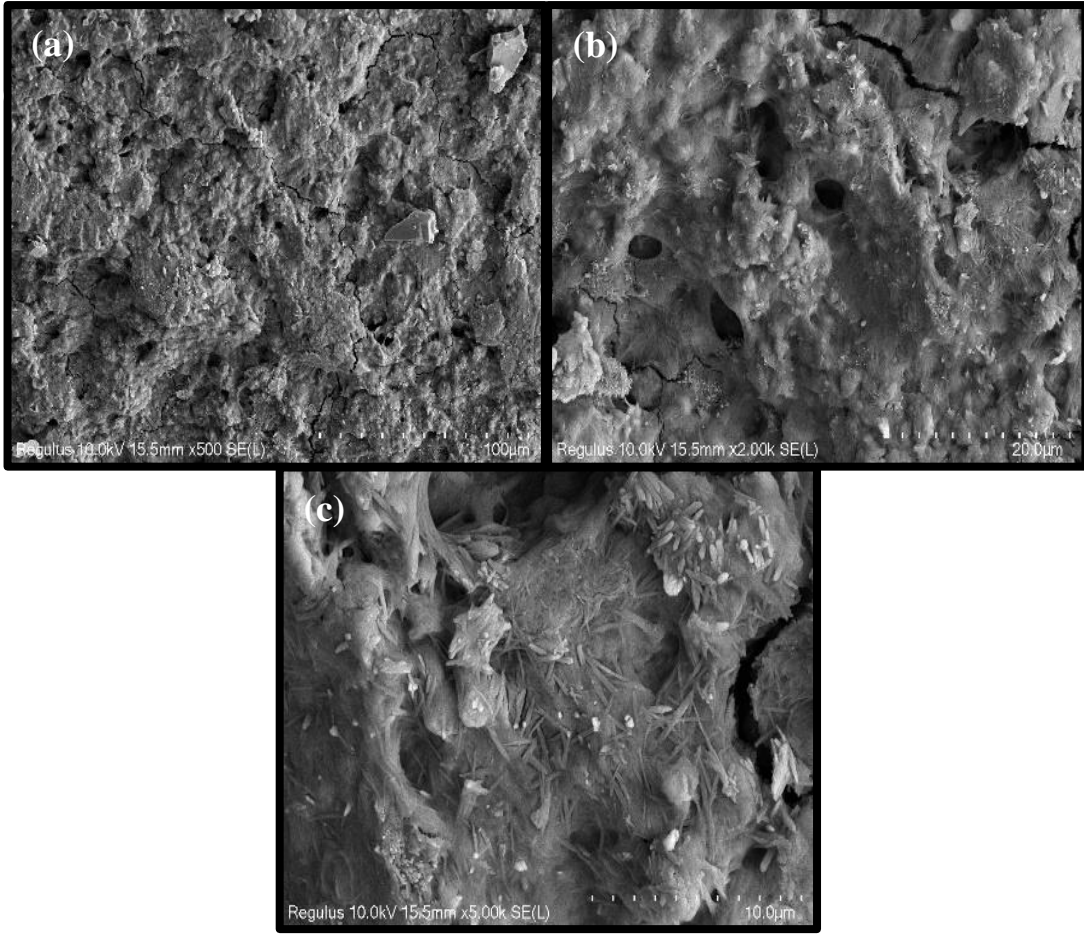
üzerinden bağlayıcı matris yapısı, gözeneklilik durumu ve reaksiyon ürünlerinin dağılımı Şekil 3.9’ de sunulan K numunesinin farklı büyütme oranlarındaki iç yapı görüntüleri aşağıda değerlendirilmiştir.



**Şekil 3.9.** K Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

Kontrol numunesine ait SEM görüntüleri, jeopolimer matrisin yüksek yoğunluklu, kompakt ve süreklilik gösteren bir N-A-S-H jel fazına sahip olduğunu göstermektedir. Bağlayıcı faz ile agrega arasında tam aderans görülmektedir. Jeopolimer jel matrisinin yüzeyi yoğun ve homojendir. Mikro ve makro boşluklar minimum düzeyde olup agrega–matris arayüz aderansı güçlüdür.

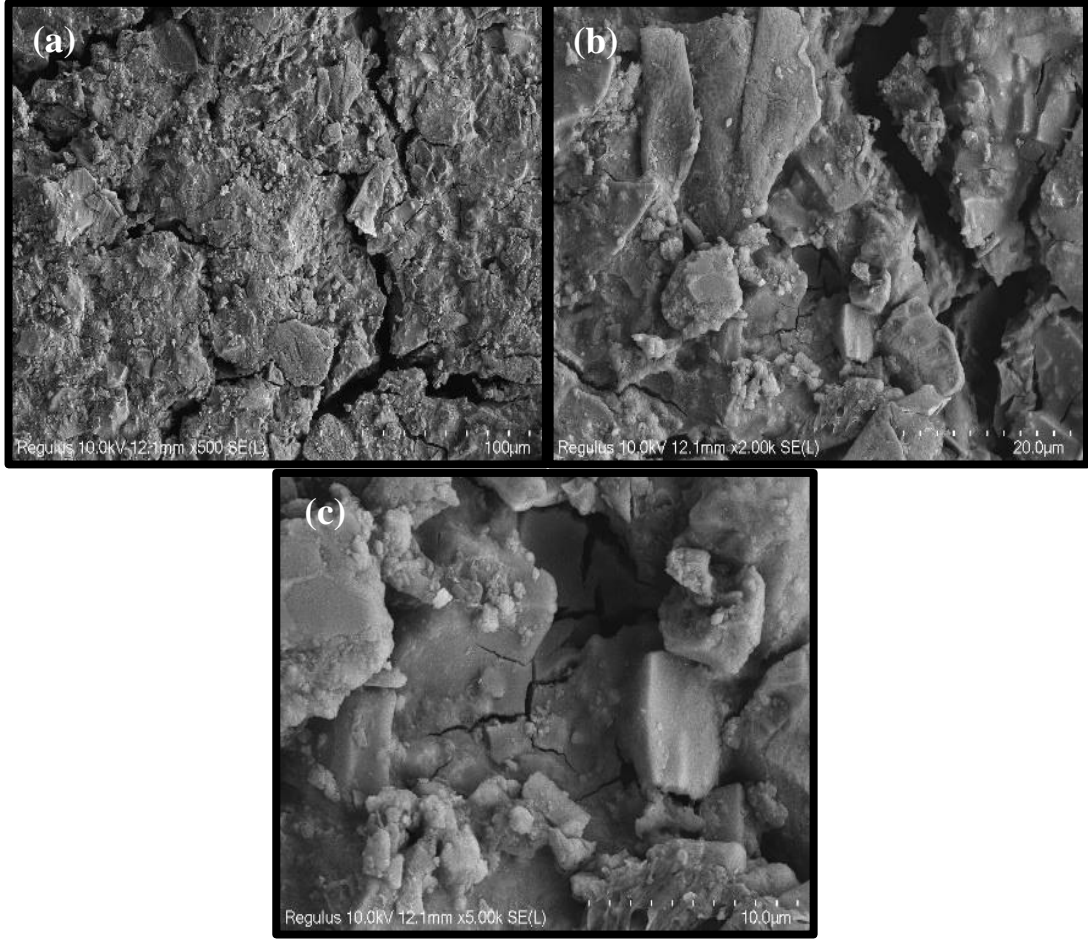
Şekil 3.10 ‘da AD10 numunesine ait FESEM görüntüleri incelendiğinde diyatomitin gözenekli karakteri nedeniyle matriste yer yer kapiler boşluklar ve daha pürüzlü bir doku gözlenmektedir.



**Şekil 3.10.** AD10 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

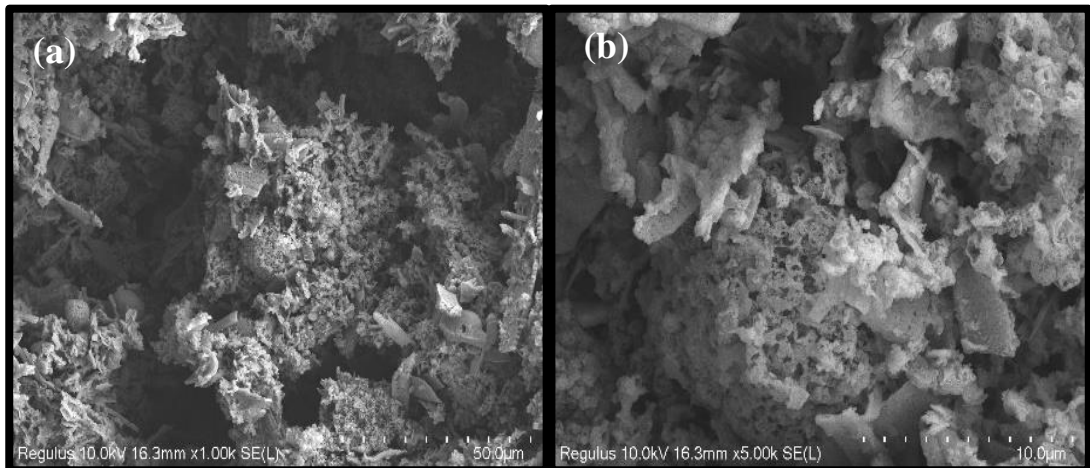
Matris içinde alkali aktivasyon ürünlerinin oluştuğu jel bölgeleri görülmekle birlikte, bazı alanlarda tam reaksiyona girmemiş ince taneler veya zayıf bağ bölgeleri bulunmaktadır. Bağlayıcı–agrega ara yüzeyinde boşluklar kontrol numunesine göre bir miktar artmış; bu durum UPV/yoğunluk/ısı iletkenliği gibi özelliklerle uyumlu bir mikroyapı gözlenmiştir.

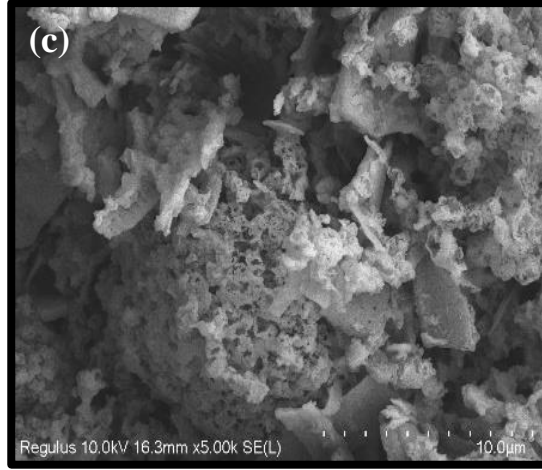
Şekil 3.11. AD20 numunesinin görüntülerinin göstermekte olup bu görüntülerde diatomit oranının artmasıyla birlikte boşluklu yapı daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Matris içinde jel fazı oluşumu sürse de gözeneklerin artışı nedeniyle yapı daha heterojen görünmektedir. Bazı bölgelerde mikro çatlaklar gözlenmektedir. Ara yüzeyde süreklilik azalarak, yer yer zayıf bağlanma ve mikro boşluk kümeleri gözlemlenmektedir.



**Şekil 3.11.** AD20 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

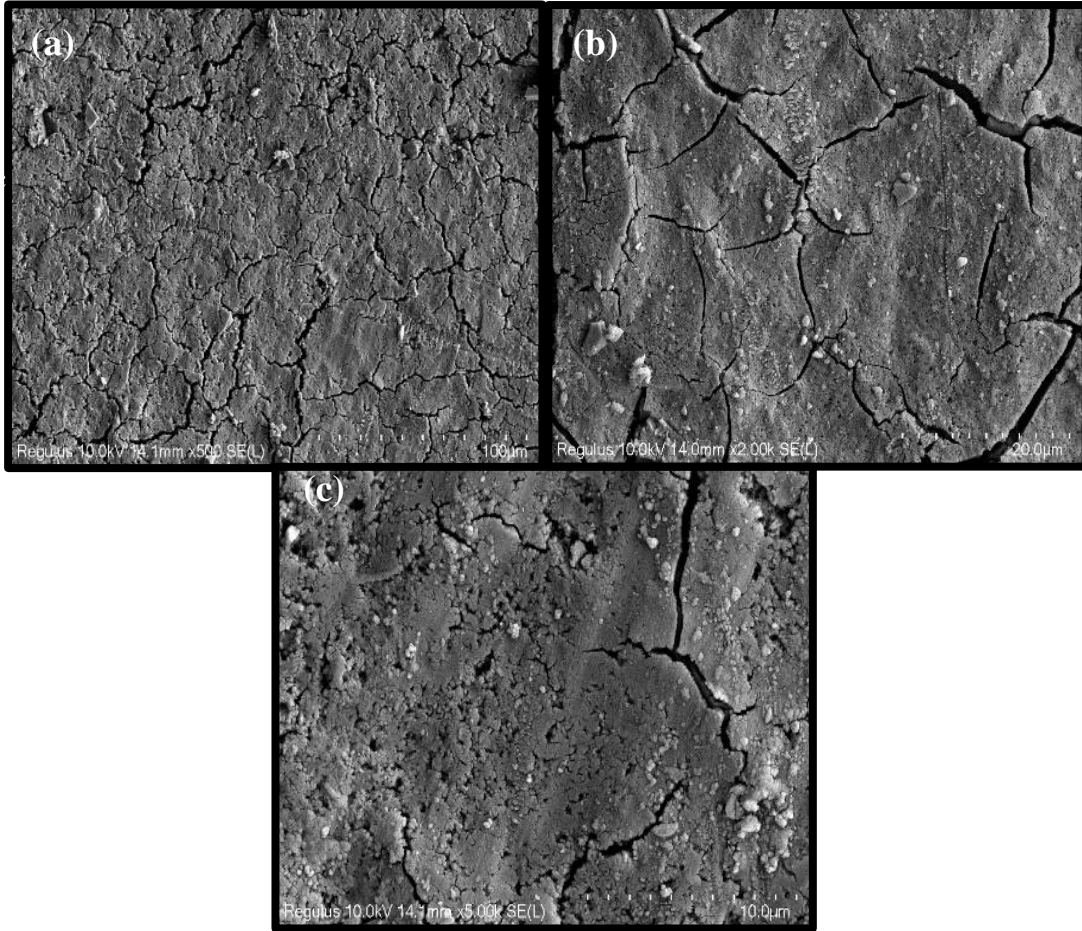
Şekil 3.12’de sunulan AD30 numunesin görüntülerinde diyatomit kaynaklı gözenekli içyapı en belirgin seviyeye geldiği görülmektedir. Matrisin daha gevşek/boşluklu ve yer yer bağlayıcı sürekliliği zayıflamış görünmektedir. Jel fazı oluşsa bile yüksek porozite nedeniyle reaksiyon ürünleri yapıyı tamamen doldurmamaktadır.





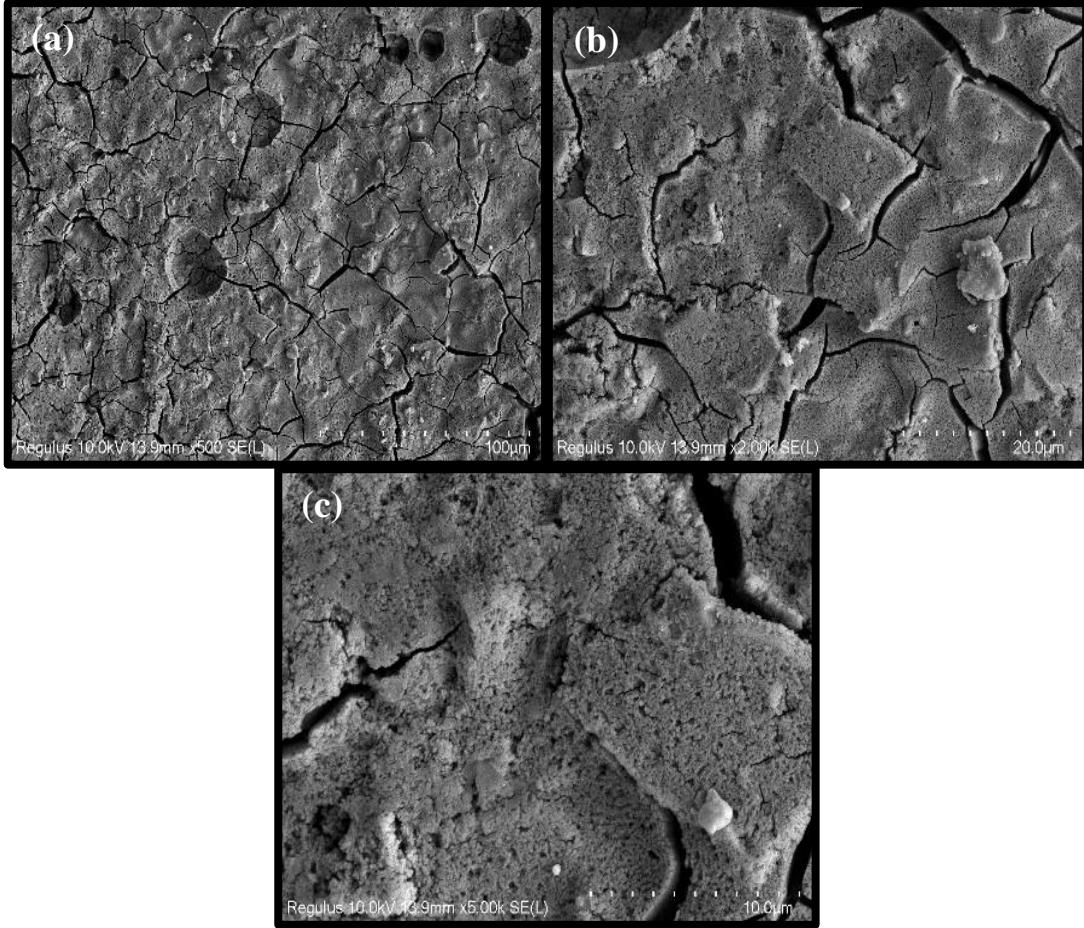
Şekil 3.12. AD30 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

Şekil 3.13' de sunulan PD10 numunesinin SEM görüntülerinde, diyatomitin gözenekli yapısının etkisiyle matriste belirli oranlarda boşluklar gözlenmektedir.



Şekil 3.13. PD10 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

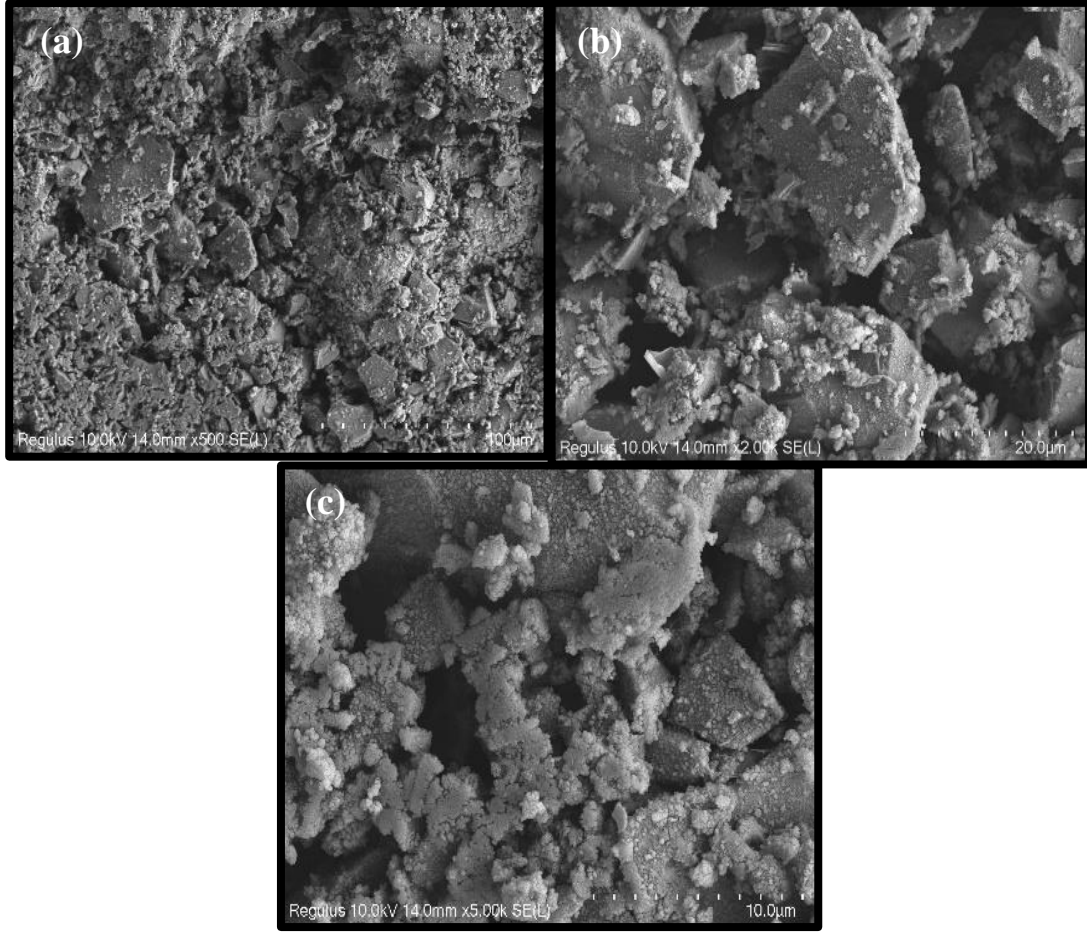
Bununla birlikte, jel fazının matris içerisinde daha sürekli ve homojen bir dağılım gösterdiği açıkça izlenmektedir. Bağlayıcı fazın, diyatomit tanelerinin çevresinde boşlukları kısmen doldurduğu ve daha sıkı bir matris yapısı oluşturduğu görülmektedir.



**Şekil 3.14.** PD20 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

Şekil 3.14' de sunulan PD20 numunesinin görüntüleri incelendiğinde diyatomit oranının artmasıyla birlikte matristeki boşluk miktarının arttığı gözlenmektedir. Buna rağmen, ince taneli diyatomit parçacıklarının dolgu etkisi ve alkali aktivasyon ürünlerinin oluşumu sayesinde bazı bölgelerde yoğun ve kompakt jel adacıkları olduğu belirlenmiştir. Mikroyapı genel olarak heterojen bir karakter sergilemekte olup, arayüz bölgesinde yer yer boşluk kümeleri ve bağlayıcı sürekliliğinde azalmalar izlenmektedir.

Şekil 3.15. ile paylaşılan PD30 numunesinin SEM görüntülerinde boşluklu içyapının belirgin şekilde arttığı görülmektedir.



**Şekil 3.15.** PD30 Numunesi (a)×500, (b)×2000, (c)×5000 Büyütme Görüntüleri

Matris içerisinde jel fazı oluşumu mevcut olmakla birlikte, yüksek diyatomit içeriği nedeniyle yapı genel olarak daha gevşek ve gözenekli bir morfoloji sergilemektedir.

Tablo 3.1'deki EDS sonuçları değerlendirildiğinde; K numunesinde O, Na, Al, Si ve Ca elementleri baskındır. Özellikle Ca içeriğinin (%18,89) yüksek olması, Ca-zengin reaksiyon ürünlerinin ve C-(A)-S-H benzeri fazların varlığına işaret etmektedir.

**Tablo 3.1.** EDS Element Değerleri

|         | K     | AD10  | AD20  | AD30  | PD10  | PD20  | PD30  |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Element | Wt%   | Wt%   | Wt%   | Wt%   | Wt%   | Wt%   | Wt%   |
| O       | 36.75 | 34.49 | 35.79 | 39.50 | 33.46 | 34.97 | 28.43 |
| Na      | 19.26 | 24.43 | 10.97 | 16.38 | 14.92 |       | 8.20  |
| Mg      |       |       | 2.42  |       | 1.95  | 4.25  | 2.51  |
| Al      | 6.07  | 7.84  | 4.98  | 6.81  | 7.47  | 8.94  | 7.68  |
| Si      | 19.03 | 13.44 | 27.75 | 37.31 | 20.90 | 16.79 | 27.20 |
| Ca      | 18.89 | 19.81 | 18.09 |       | 21.30 | 35.06 | 25.98 |

Na ve Si'nin birlikte bulunması, alkali aktivasyonun etkin şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. AD10 numunesinde diyatomit katkısıyla birlikte Si içeriğinin (%13,44) arttığı,

Ca'nın ise hâlen önemli düzeyde olduğu görülmektedir. Bu durum, Na-Al-Si esaslı jel oluşumunun başladığını ve sistemde hibrit jel yapılarının (N-A-S-H + C-(A)-S-H) gelişebileceğini göstermektedir.

AD20 numunesinde Si oranının belirgin şekilde artması (%27,75), diyatomitin reaktif silis katkısının sistemde daha etkin hâle geldiğini göstermektedir. Na oranındaki düşüş ve Ca'nın varlığı, daha dengeli ve gelişmiş bir geopolimerizasyon sürecine işaret etmektedir.

AD30 numunesinde Si (%37,31) ve O oranlarının yüksek olması silisçe zengin bir yapı oluştuğunu göstermektedir. SEM bulgularıyla birlikte değerlendirildiğinde, yüksek diyatomit oranının matris sürekliliğini sınırladığı ve gözenekliliği artırdığı anlaşılmaktadır.

PD10 numunesinde Ca oranının (%21,30) görece yüksek olması, Polatlı diyatomitinin Ca katkılı reaksiyon ürünlerini desteklediğini göstermektedir. Na'nın daha dengeli dağılımı, jel oluşumunun daha homojen gerçekleştiğine işaret etmektedir.

PD20 numunesinde Ca oranının oldukça yüksek olması (%35,06), Ca-ağırlıklı jel fazlarının baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, yoğun ancak yer yer heterojen bir mikro yapı oluşumuna işaret etmektedir.

PD30 numunesinde Si (%27,20) ve Ca (%25,98) oranlarının birlikte yüksek olması, hibrit jel yapısının bu numunede de sürdüğünü göstermektedir. Bu yapı, SEM analizlerinde gözlenen boşluklu ancak bazı bölgelerde yoğunlaşmış jel adacıklarıyla uyumludur.

SEM görüntülerinde diyatomit katkılı jeopolimer harç numunelerinde gözlenen mikro çatlak oluşumu, geopolimerizasyon sürecinde meydana gelen hacimsel değişimler ve mikroyapısal süreksizliklerle ilişkilidir. Jeopolimer bağlayıcı sistemlerde mikro çatlakların temel oluşum mekanizmaları; kimyasal büzülme, kuruma büzülmesi, ısıl büzülme ve agrega-matris ara yüzeyinde meydana gelen gerilme yoğunlaşmaları olarak tanımlanmaktadır (Davidovits, 2013; Provis ve van Deventer, 2014).

Jeopolimer matris içerisinde reaksiyon sırasında suyun kimyasal olarak tüketilmesi ve kapiler suyun buharlaşması, bağlayıcı fazda hacimsel küçülmeye neden olmakta; bu durum özellikle yüksek poroziteye sahip sistemlerde mikro çatlak oluşumunu artırmaktadır. Provis ve van Deventer (2014), jeopolimer sistemlerde kuruma büzülmesinin Portland çimentosu esaslı sistemlere kıyasla bazı koşullarda daha yüksek olabileceğini ve bunun mikroyapısal sürekliliği olumsuz etkileyebileceğini belirtmiştir. Ayrıca yüksek Si/Al oranına sahip jeopolimer sistemlerde jel fazının daha kırılabilir bir yapı sergileyebileceği ve bunun mikro çatlak oluşum riskini artırdığı literatürde ifade edilmektedir (Davidovits, 2013).

Bu çalışmada, AD serisinde diyatomit oranının artmasıyla birlikte mikroyapıda gözenekliliğin belirgin şekilde arttığı ve buna paralel olarak mikro çatlakların daha yaygın hale geldiği gözlenmiştir. Diyatomitin yüksek özgül yüzeyi ve gözenekli yapısı, matris içerisindeki suyun daha hızlı uzaklaşmasına ve kuruma büzülmesinin artmasına neden olmuş; bu durum mikro çatlak oluşumunu tetiklemiştir. Buna karşılık, PD serisinde bazı numunelerde jel fazının daha sürekli bir dağılım göstermesi, mikro çatlak oluşumunun görece olarak daha sınırlı kalmasına katkı sağlamıştır.

Mikro çatlak yoğunluğunun mekanik ve fiziksel özelliklerle ilişkisi değerlendirildiğinde, çatlakların arttığı numunelerde basınç dayanımı ve ultrasonik geçiş hızı (UPV) değerlerinde düşüş eğilimi olduğu görülmektedir. Bu durum, mikro çatlakların jeopolimer matrisin sürekliliğini bozarak yük aktarım mekanizmasını zayıflattığını göstermektedir. Ayrıca mikro çatlakların artması, gözenek yapısının genişlemesiyle birlikte ısı iletkenlik ve ısı yayılım değerlerinde azalma eğilimiyle uyumlu bir davranış sergilemiştir.

SEM bulguları ve literatür verileri birlikte değerlendirildiğinde, mikro çatlak oluşumunun diyatomit katkı oranı, jel fazının sürekliliği ve agrega–matris ara yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğu ortaya konulmuştur. Bu bulgular, diyatomit katkısının jeopolimer harçların mikroyapısını çok boyutlu bir şekilde etkilediğini ve mikro çatlakların mekanik ve ısı performans üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Davidovits, 2013; Provis ve van Deventer, 2014).

EDS ve SEM analizleri birlikte değerlendirildiğinde, mikroyapısal özellikler ile dayanım ve UPV sonuçları arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. K numunesinde yüksek Ca içeriği ve SEM’de gözlenen daha yoğun matris yapısı, Ca-zengin reaksiyon ürünlerinin geliştiğini ve buna bağlı olarak daha yüksek dayanım ve UPV değerlerinin elde edildiğini göstermektedir. AD10 ve AD20 numunelerinde diyatomit katkısıyla artan Si içeriği, Na-Al-Si esaslı jel oluşumunu desteklemiş; özellikle AD20 numunesinde daha dengeli bir mikro yapı oluşarak mekanik ve ultrases sonuçları olumlu yönde etkilenmiştir. Buna karşılık AD30 numunesinde artan gözeneklilik ve matris süreksizliği, dayanım ve UPV değerlerinde düşüşle uyumlu bir davranış sergilemiştir. PD serilerinde EDS’de tespit edilen görece yüksek Ca içerikleri, SEM’de daha iyi bağlanma ve yer yer yoğunlaşan hibrit jel fazlarıyla örtüşmüş; bu durum özellikle PD10 ve PD20 numunelerinde daha yüksek dayanım ve UPV değerleriyle uyumlu bulunmuştur. Genel olarak, diyatomit kaynağı ve katkı oranının jel türü, matris sürekliliği ve boşluk yapısını belirlediği ve bu mikroyapısal farkların mekanik performansa doğrudan yansıdığı sonucuna varılmıştır.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Afyonkarahisar ve Polatlı yörelerinden elde edilen diyatomitlerin, standart kum yerine farklı oranlarda agrega olarak ikame edilerek alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçlarda kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Çalışmada, diyatomit katkısının işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, mekanik dayanım, ısı iletkenlik ve mikroyapısal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

DeneySEL sonuçlara göre, Afyonkarahisar diyatomiti ikame oranının artmasıyla hem eğilme hem de basınç dayanımlarında belirgin kayıplar meydana gelmiştir. Kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımındaki maksimum düşüş oranı 28 günlük kür yaşında yaklaşık %55,7 olarak belirlenirken, basınç dayanımındaki maksimum düşüş oranının aynı kür yaşında yaklaşık %82,4'e ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, diyatomitin gözenekli yapısı ve yüksek su emme kapasitesinin bağlayıcı matrisin sürekliliğini zayıflattığını, içyapıda boşluk oranını ve mikro çatlakları artırarak süreksizlik oluşturduğunu ve dolayısıyla mekanik performansı olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. PD katkılı seriler AD' ye kıyasla daha yüksek dayanım değerleri göstermiş, ancak ikame oranı arttıkça bu serilerde de mekanik performansta düşüş gözlenmiştir. Basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde ise, düşük katkı oranlarında (%10–%20) mekanik dayanım korunurken, %30 seviyesinde dayanımda belirli bir azalma gözlenmekle birlikte, ısı yalıtım performansında çok önemli bir iyileşme sağlanmıştır.

Diyatomit agregalarının sağladığı gözenekli içyapı, erken yaşlarda alkali aktivasyon ürünlerinin hızlı oluşumunu teşvik ederek dayanım artışına katkı sağlamış; ancak silika açısından zengin alkali aktive edilmiş sistemlerde jel fazlarının zamana bağlı yeniden düzenlenmesi, dayanım gelişim hızında sınırlı bir yavaşlamaya yol açmıştır. Bunun sonucunda basınç dayanımı sonuçları, diyatomit katkılı serilerin geç dönem değerlerinin erken dönem değerlerinden dahi düşük olduğunu göstermiştir. Literatürde, geopolimer sistemlerde erken yaşta hızlı jel oluşumu ve dayanım kazanımının gerçekleştiği, ancak zamanla jel fazlarının yeniden düzenlenmesi (restructuring), mikro çatlak oluşumu ve içyapının dengeye ulaşma süreci nedeniyle dayanım artış hızının azalabileceği veya sınırlı düşüşler meydana gelebileceği ifade edilmektedir (Davidovits, 2013; Provis ve van Deventer, 2018).

Ayrıca, diyatomit gibi yüksek gözenekliliğe sahip agregaların kullanılması durumunda, içyapıdaki boşluk oranının artması ve kuruma sırasında oluşan iç gerilmeler nedeniyle mikro çatlakların gelişebileceği ve bunun geç yaş mekanik dayanımı olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir (Neville, 2011). Hafif agregalı ve alkali aktive edilmiş sistemlerde erken yaş dayanım avantajı ve ilerleyen yaşlarda farklı gelişim eğilimlerinin gözlemlendiği literatürde rapor

edilmiştir (Wongkeo vd., 2014). Bu bağlamda, bu çalışmada gözlenen geç yaş dayanımındaki düşüş, sistemin zayıflığından ziyade, gözeneklilik, jel fazlarının zamana bağlı evrimi ve alkali aktivasyon mekanizmasıyla ilişkili doğal bir davranış olarak değerlendirilebilir.

Birim hacim ağırlık sonuçları, diyatomit ikame oranının artmasıyla birlikte harçların yoğunluğunun belirgin biçimde azaldığını göstermektedir. Kontrol numunesine kıyasla birim hacim ağırlıktaki maksimum düşüş oranı, Afyonkarahisar diyatomiti kullanılan serilerde yaklaşık %23,8 olarak belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları da bu bulgularla uyumlu olup, kontrol numunesine göre maksimum düşüş oranının AD serilerinde yaklaşık %57,9'a ulaştığı tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları da bu bulguları desteklemiş, AD serilerinde PD serilerine kıyasla daha düşük değerler elde edilerek daha gözenekli ve boşluklu bir yapı doğrulanmıştır. Diyatomit ikamesi, malzemenin mikro yapısını daha gözenekli ve daha az sürekli hale getirmiş; aynı zamanda diyatomitin daha hafif yapıların elde edilmesine katkı sağladığını ortaya koymuştur.

Isıl iletkenlik verileri, yoğunluk ve basınç dayanımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, diyatomit katkısının jeopolimer harçların hem mekanik hem de fiziksel özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Katkı oranı arttıkça numunelerin yoğunluk değerleri azalmakta, buna paralel olarak ısı iletkenlik katsayılarında da belirgin bir düşüş meydana gelmektedir. Bu durum, diyatomitin gözenekli yapısının malzeme bünyesinde boşluk hacmini artırmasıyla açıklanabilir. Özellikle AD30 ve PD30 numuneleri düşük ısı iletkenlik katsayıları ile öne çıkmış, bu numuneler enerji verimli yapı malzemeleri açısından en uygun karışımlar olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, diyatomit katkılı jeopolimer harçların yapısal kullanım ile ısı performans arasında optimum bir denge sağlayabildiğini ve özellikle yalıtım amaçlı uygulamalarda yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Mikroyapıda SEM–EDS bulguları, GYFC' nin sağladığı kalsiyumun hibrit jel oluşumunu destekleyerek bağlayıcı matrisin sürekliliğini artırdığını, diyatomitin ise gözeneklilik ve hafiflik kazandırarak ultrases geçiş hızı ve ısı iletim özellikleri üzerinde belirleyici bir etki oluşturduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, jeopolimer harçların performansının Ca–Si dengesine güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, diyatomit ilavesinin jeopolimer harçların yoğunluğunu azaltarak hafif yapı malzemelerinin üretimine olanak sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, yoğunluktaki bu azalmanın mekanik dayanım değerlerinde

belirli düşüŖlere yol açtığı belirlenmiŖtir. Bu nedenle diyatomit katkılı geopolimer harçların, hafif yapı elemanları ve yalıtım amaçlı uygulamalar için uygun bir alternatif olduğu deđerlendirilmiŖtir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, diyatomit katkılı geopolimer harçların hafiflik ve ısı performans açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu malzemelerin yapı elemanı olarak daha yaygın kullanılabilmesi için uzun süreli performanslarının ayrıntılı biçimde araştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda, sülfat, asit ve klorür etkilerine karşı direnç, donma-çözölme direnci gibi kalıcılık özelliklerinin yanı sıra taze hal özelliklerinden reolojik davranış, yerleşebilirlik ve uygulama performansının incelenmesi konuları da araştırılabilir. Ayrıca farklı kür koşulları, alkali aktivatör tür ve oranları ile farklı diyatomit kaynaklarının geopolimer sistemler üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, diyatomit katkılı geopolimer harçların prefabrik hafif yapı elemanları ve yalıtım amaçlı kompozit malzemeler olarak kullanım potansiyelinin daha kapsamlı biçimde ortaya konmasına katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- Ahmadi, Z., Esmaili, J., Kasaei, J., ve Hajjalioghli, R.** (2018). Yüksek Hacimde Ham Diyatomit Tozu İçeren Çevre Dostu Çimento Harçlarının Özellikleri. *Sustainable Materials and Technologies*.
- Akbaba, H.** (2020). Diyatomit Agregalı Blok Elemanların Yüksek Sıcaklık ve Donma-Çözülme Etkisinde Bazı Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 445-454.
- Alakara, E. H.** (2022). İnşaat Yıkıntı Atıklarından Elde Edilen Atık Tuğlaların Geopolimer Harçlarda Kullanımının İncelenmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11(3), 251-259.
- Alvarado, C., Martínez Cerna, D., ve Alvarado Quintana, H.** (2024). Kaolin, Diyatomit Ve Pirinç Kabuğu Külünden (Rha) Üretilen Jeopolimer Malzemelerin Tavan Isı Yalıtımındaki Potansiyeli. *Buildings*, 14(1), 112
- American Concrete Institute (ACI Committee 213R-14).** (2014).“Yapısal Hafif Agregalı Beton İçin Kılavuz”, Amerikan Beton Enstitüsü.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., ve Ali, A. A.** (2015). Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review. *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005.
- Ayşe, E. S. E. R., Oztürk, Z. B., Atabey, İ. İ., ve Çelikten, S.** (2024). Uçucu Kül Ve Farklı Seramik Sektörü Atıklarının Kullanımı İle Üretilen Geopolimer Harçların Dayanım Özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 1-1.
- Binici, H., Görür, E. B., ve Durgun, M. Y.** (2016). Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Mekanik Aşınması ve Su Geçirimsizliği. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 1-10.
- Çakır, Ö., ve Sayaca, S.** (2021). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(2), 939-952.
- Çelikten, S., Sarıdemir, M., ve Deneme, İ. Ö.** (2019). Mechanical And Microstructural Properties Of Alkali-Activated Slag And Slag+ Fly Ash Mortars Exposed To High Temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50-61.
- Çetin, M., ve Taş, B.** (2012). Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diyatomit. *TÜBAV Bilim*

*Dergisi*, 5(2), 28–46.

**Çiçek, F. Z.** (2024). Çimento Yerine Farklı Bağlayıcı İkameli Bims Türü Hafif Kompozit Malzeme Üretimi (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi.

**Davidovits, J.** (2013). *Jeopolimer Kimyası ve Uygulamaları* (4. baskı). Jeopolimer Enstitüsü.

**El Miski, Y., Kharbouch, Y., Ameer, M., Zine, O., ve Taoukil, D.** (2025). Comparative Analysis of Artificial Neural Networks Models for Predicting Mortar Properties with Diatomite Incorporation. *Materials Chemistry and Physics*, 333, 130386.

**EN 197-1 (2011)** “Cement - Composition, Specifications And Conformity Criteria For Common Cements” European Committee for Standardization.

**EN 196-1 (2016)** (2016). “Methods of Testing Cement – Part 1: Determination of Strength, CEN.” European Committee for Standardization.

**Ferreira, R. L. S., Pinto, L., Nóbrega, A. F., ve Carneiro, A. M. P.** (2024). Diyatumlu Toprak (DE): Harçların Özellikleri Üzerindeki Etkiler — Fiziksel, Kimyasal Ve Mikroyapısal Bir İnceleme. *Construction and Building Materials*. 421, 135711.

**Gültürk, E., ve Güden, M.** (2011). Diyatomitlerin Polimer Kompozitlerde Kullanımı Ve Diyatomit Katkılı Epoksi Kompozitlerin Termal Özellikleri. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 13(3), 13-21.

**Gündüz, L., ve Kalkan, Ş. O.** (2016). Diyatomit agregaların çimento esaslı hafif harç özelliklerinin gelişimine etkisi. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13–14 Ekim Kütahya, s. 284–294.

**İlkenntapar, S., Eren, H.** (2021). EPS İle İkame Edilmiş Uçucu Küllü Geopolimer Hafif Harcın Fiziksel, Mekanik ve Isıl Geçirimsizlik Özelliklerinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 9(1), 28-38.

**İpek, S., ve Ekmen, Ş.** (2022). Yapı Malzemelerinin Geopolimer Harç Üretiminde Kum Olarak Geri Dönüştürülmesinin İncelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(17), 404-419.

**Karabulut, B., Şahin Yön, M., ve Karataş, M.** (2024). Öğütülmüş Diyatomit İkameliyle Kendiliğinden Yerleşen Harçların Taze Ve Erken Yaş Mekanik Özellikleri. *Fırat Üniversitesi Deneysel ve Hesaplamalı Mühendislik Dergisi*, 3(3), 350–361.

**Karahisar Gökkonca, E.** (2010). *Diyatomitin Yapı Malzemeleri Endüstrisinde Kullanımı*

*Üzerine Araştırma* (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD).

**Karakurt, C., ve Özen, U.** (2017). Doğal Hafif Agregaların Betonun Özelliklerine Etkisi. *Türk Kimya Derneği Dergisi, Bölüm B: Kimya Mühendisliği* 1 (2), 9–16.

**Malhotra, V. M., ve Carino, N. J.** (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2nd ed.). CRC Press.

**Mehta, P. K., ve Monteiro, P. J. M.** (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed., p. 1). McGraw-Hill Education.

**Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., ve Horvath, A.** (2018). Carbon Dioxide Reduction Potential In The Global Cement Industry By 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124.

**Mindess, S., Young, J. F., ve Darwin, D.** (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.

**Montes-Hernandez, G.** (2025). Decarbonizing The Cement Industry is Crucial For Reducing CO<sub>2</sub> Emissions: Myth or Reality? *Chemical Engineering Journal*, 518, 164995. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.164995>

**Nath, P., Sarker, P. K.** (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171.

**Neville, A. M.** (2011). *Betonun Özellikleri* (5. baskı). Pearson Education.

**Özbey, G., ve Atamer, N.** (1987). Kizelgur (Diatomit) Hakkında Bazı Bilgiler.

**Pavliková, M., Rovnaníková, P., Záleská, M., ve Pavlík, Z.** (2022). Diatomaceous Earth—Lightweight Pozzolanic Admixtures for Repair Mortars—Complex Chemical And Physical Assessment. *Materials*, 15(19), 6881.

**Pehlivan, H.** (2023). Sodyum Hidroksit ile Aktive Edilmiş Farklı Volkanik Orijinli Kayaç Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 10(26), 105-116.

**Pimraksa, K., ve Chindaprasirt, P.** (2009). Tayland'ın Lampang Bölgesinden Elde Edilen Diyatumlu Toprağın Hafif Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliği. *Applied Clay Science*, 45(2), 164–170.

**Provis, J. L., ve van Deventer, J. S. J. (Eds.).** (2018). Alkali Activated Materials. *Cement and*

*Concrete Research* 114, 40-48

**Round, F. E., Crawford, R. M., ve Mann, D. G.** (1990). *The Diatoms: Biology And Morphology Of The Genera. Cambridge University Press.*

**Saridemir, M.** (2016). Alkali İle Aktive Edilmiş Öğütülmüş Diyatomitli Harçların Dayanım Özellikleri. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 124–134.

**Serin, G., Çankıran, O., Başığit, C., ... Taş, H. H.** (2016). Normal, Hafif ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(1), 15-22.

SEPMAŞ (2025). *Diyatomit*. [Erişim: 10.08.2025, <https://sepmas.com/hizmet/diyatomit>]

**Serin, G., Çankıran, O., Başığit, C., Taş, H. H., ve Fenkli, M.** (2007). Normal, Hafif Ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(1), 15-22.

**Sezgin, M.** (1998). *Diyatomitin Hafif Yapı Eldesinde Değerlendirilebilirliği* (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta).

**Şenol, A. F.** (2025). Performance of geopolymer mortar incorporating spent coffee grounds as a recycled building material: An experimental and predictive analysis. *Hybrid Advances*, 10, 100479.

**Taş, B., Taş, B., ve Çetin, M.** (2012). Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diyatomit. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 5(2), 28-46.

**Toprak, M. U., Şenol, A. F., Demiral, N. Ç., ve Karakurt, C.** (2022). Tuğla, Kiremit ve Mermer Atığı Tozları ile Üretilen Jeopolimer Harçların Özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 918-930.

**Turner, L. K., ve Collins, F. G.** (2013). Carbon Dioxide Equivalent (CO<sub>2</sub>-E) Emissions: A Comparison Between Geopolymer and OPC Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.

**TS EN 12390-1**, “Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney Numunesi Ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

**TS EN 772-4**, “Kâgir Birimler- Deney Metotları- Bölüm 4: Tabii Taş Kâgir Birimlerin Toplam Ve Görünen Porozitesi ile Boşluksuz ve Boşluklu Birim Hacim Kütlelerinin Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

**TS EN 933-1**, “Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

**TS EN 1015–11/A1**, “Kâgir Harcı-Deney Metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç Ve Eğilme Dayanımının Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

**TS EN 12504-4**, “Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultra Ses Geçiş Hızının Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

**TS EN 1015-3**, “Kâgir Harcı-Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayıma Tablası İle)”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

**Uygun, A. (1976)**. DİATOMİT Jeolojisi, ve yararlanma olanakları. *Scientific Mining Journal*, 15(5), 31-38.

**Uygunoğlu, T., ve Ünal, O. (2006)**. Diyatomitin Hafif Blok Üretiminde Kullanılması. *Journal of Polytechnic*, 9(1), 65–70.

**Ünal, S., ve Canbaz, M.** Activation of Waste Glass Powder with Sodium Hydroxide to Produce Eco-Friendly Geopolymer: *Glassmer. Civil Engineering*. 11076

**Werner, D. (1977)**. The Biology Of Diatoms. *University of California Press*.

**Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarurojana, A., ve Chaipanich, A. (2014)**. Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 64, 261-269.

**World Steel Association (2025)**. World Steel İn Figures 2025. *Brussels: World Steel Association*.

Zirve Maden (ZM) (2025). *Afyonkarahisar Diyatomit Yatağı*. [Erişim: 10.08.2025, <https://zirvemaden.com.tr>]