

**T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**POMZA İKAMELİ GEOPOLİMER HARÇLARIN
DAYANIM VE DURABİLİTE PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Taha Salah Wahhab AL-ANTAKI

Danışman

Doç.Dr. Anıl NİŞ

İstanbul – 2025

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Taha Salah Wahhab AL-ANTAKI

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Pomza İkameli Geopolimer Harçların Dayanım ve Durabilite Performanslarının İncelenmesi

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tezin Türü : Doktora

Tezin Tarihi : 09.01.2025

Sayfa Sayısı : 148

Tez : Doç.Dr. Anıl NİŞ

Danışmanları

Dizin Terimleri : Geopolimer, Bazaltik Pomza, Uçucu, Cüruf Kül, Dayanım, Durabilite, Mekanik Özellikler, Mikro Yapı, Sürdürülebilirlik, Çevre Dostu Malzemeler, Yüksek Sıcaklıklar, Sülfürik Asit, Magnezyum Sülfat, Alkali Çözeltisi, Alkali-Aktive Edilmiş Harçlar

Türkçe Özet : Farklı pomza oranlarında ikameli uçucu kül ve cüruf ile geopolimer harçların üretilmiştir, dayanım ve durabilite performansları incelenmiştir.

Dağıtım Listesi : 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

Taha Salah Wahhab AL A-NTAKI

**T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**POMZA İKAMELİ GEOPOLİMER HARÇLARIN
DAYANIM VE DURABİLİTE PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Taha Salah Wahhab AL-ANTAKI

Danışman

Doç.Dr. Anıl NİŞ

İstanbul – 2025

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Taha Salah Wahhab AL-ANTAKI

.../.../2025



İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Taha Salah Wahhab AL-ANTAKI' nın Pomza İkameli Geopolimer Harçların Dayanım ve Durabilite Performanslarının İncelenmesi adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Savaş ERDEM

Üye

Doç. Dr. Anıl NİŞ
(Danışman)

Üye

Doç. Dr. Metin MEHMETOĞLU

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hamit ÖZTÜRK

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 20..

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Çimento inşaat sektöründe en önemli ve en çok kullanılan bir bağlayıcı yapı malzemesidir. Diğer taraftan çimento sektörünün, gerek milyonlarca ton klinker hammaddesinin arazilerden kazılarak çıkarılması, gerekse klinkerin yüksek sıcaklık fırınlarında yakılırken açığa çıkardığı yüksek miktardaki karbondioksit (CO_2) emisyonları sebebiyle çevre ve ekolojik dengeyi olumsuz etkileri olduğu bilinen bir hakikattir. Dünya genelindeki toplam CO_2 salınımının yaklaşık %7'sini oluşturan bu endüstriyel süreç, günümüzde çevreye en zarar veren üretim süreçlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bir ton çimento üretimi sırasında yaklaşık 700-760 kilogram CO_2 eşdeğeri emisyonun açığa neden olur.

Bu gerçekler göz önüne alındığında, araştırmacılar hem çevresel etkileri azaltan hem de uzun vadede maliyet etkinliği yüksek yeni çözümler bulmak için çalışmalar yapmaktadır. İnşaat sektöründe alternatif bağlayıcı geliştirmek için araştırmacılar çaba göstermektedirler. Jeopolimer teknolojisinin inşaat sektöründe sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıktığı oldukça açık. Geopolimerlerin çimentoya göre daha az sera gazı emisyonu yaratması, özellikle iklim değişikliğiyle mücadelede büyük bir potansiyel taşıyor. Portland çimentosunun üretiminde, sürdürülebilirlik ve çevresel etki azaltma hedefiyle atık malzemeler ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımı üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak puzolanik özelliklere sahip, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis duman gibi yan ürünlerin kısmi veya tam ikamesi ile yeni bağlayıcı sistemler geliştirilmesini amaçlamıştır.

Temel olarak, silika-alümina bakımından zengin kaynaklar ve puzolanik malzemeler, jeopolimer teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Bu kaynaklar, Si-O ve Al-O bağlarının oluşumuna olanak sağlayan temel yapı taşlarıdır. Bu malzemelerin özellikleri ve oranları, jeopolimerlerin nihai özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir. Kimyasal aktivatörlerle birlikte alkalın bir ortamda yeniden aktive edilen bu malzemeler, geleneksel çimento üretimine alternatif sürdürülebilir bir bağlayıcı sistem sunmaktadır. Uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimerler, dünya genelinde kapsamlı araştırmalara ve pratik uygulamalara konu olmuştur. Bu malzemeler, endüstriyel atıkların geri dönüşümü ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadırlar. Buna karşılık, pomza esaslı

geopolimerler henüz yeterince çalışılmamış bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya genelinde bu konuda çok az sayıda bilimsel çalışma yapılmış olması, pomza bazlı geopolimerlerin keşfedilmemiş bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bu durum, araştırmacılar için pomza esaslı geopolimerler üzerinde çalışma ve araştırma yapma konusunda önemli bir fırsat alanı oluşturmaktadır. Özellikle pomzanın yerel ve bol miktarda bulunabildiği bölgelerde yapılacak bilimsel araştırmalar pomza malzemesinin beton içerisinde bağlayıcı olarak kullanımı ile özellikle sürdürülebilirlik ve ekonomi açısından fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, farklı oranlarda bazaltik pomza tozu içeren uçucu kül ve cüruf bazlı alkali aktive edilmiş harçların, 7, 28 ve 56 günlük kürlenme süreleri, 8M, 12M ve 16M sodyum hidroksit konsantrasyonları, 200, 400 ve 600°C sıcaklıklar ve %5 sülfürik asit ile %5 magnezyum sülfat çözeltilerine 56 gün süre ile maruz bırakılma koşullarında elde edilen mekanik dayanım ve durabilitesi bu çalışma kapsamında detaylı olarak incelenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı testleri, yüksek sıcaklıklar ve asit ile magnezyum sülfat maruziyetinden kaynaklanan makro ölçekteki değişimleri tespit etmek için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, numunelerde mikro ölçekteki farklılıkları gözlemlemek için taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dispersif X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri de yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, bazaltik pomza tozu eklenmesinin harçların basınç dayanımını düşürdüğünü ortaya konmuştur. Sodyum hidroksit (NaOH) miktarının artırılması ve kürlenme süresinin uzaması ise basınç dayanımını artırmıştır. En düşük dayanım, %50 pomza içeren ve 7 gün kürlenmiş harçlarda gözlenirken, en yüksek dayanım pomzasız ve 56 gün kürlenmiş harçlarda elde edilmiştir. Pomza parçacıklarının tam olarak reaksiyona girmesi için daha uzun bir süre gerekmesi nedeniyle, pomza içeren harçların tam potansiyeline ulaşması için daha uzun kürlenme sürelerine ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. NaOH miktarındaki artış, genel olarak dayanımı artırmış olsa da yüksek sıcaklıklara maruz kalan harçların dayanım kaybı üzerindeki etkisi sınırlı olmuştur. Bu durum, (8M) NaOH konsantrasyonlarının ekonomik açıdan daha uygun olabileceğini göstermektedir. %30'a kadar pomza ilavesi, yüksek sıcaklık etkilerine karşı harçların dayanımını önemli ölçüde düşürmeden kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, cüruf ve uçucu kül bazlı alkali aktifleşmiş harçlarda yüksek sıcaklık direnci için pomzanın uygun bir katkı malzemesi olduğunu desteklemektedir. %5

sülfürik asite ve %5 magnezyum sülfata maruz bırakılan basınç dayanımları, pomza içeriği arttıkça kaybın azaldığını göstermektedir. %50 pomza ikamesi ile bu etki belirginleşmektedir. Dayanım kaybı, sülfürik asit ve magnezyum sülfat maruziyeti nedeniyle alumina-silikat bağlarının bozulmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen deneyler sonucunda, pomza içeren numuneler, pomza içermeyenlere göre daha iyi durabilite performansı sergilemekte, 12M geopolimer örnekleri ise %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat ortamlarında 8M ve 16M örneklerine göre daha iyi performans göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, dayanıklılık, bazaltik pomza, uçucu kül, cüruf, yüksek sıcaklıklar, sülfürik asit, magnezyum sülfat, alkali çözeltisi, Alkali-aktive edilmiş harçlar

SUMMARY

Cement is the most important and widely used binding material in the construction industry. However, the Portland cement industry has significant adverse environmental impacts, including the extraction of millions of tons of clinker raw materials and the high levels of carbon dioxide (CO₂) emissions released during the high-temperature production of clinker. This industrial process, which accounts for approximately 7% of global CO₂ emissions, is considered one of the most environmentally damaging production processes today. Approximately 700-760 kilograms of CO₂ equivalent emissions are released during the production of one ton of Portland cement. In the light of these facts, researchers are working to find new solutions that are both environmentally friendly and cost-effective in the long term.

Researchers are striving to develop alternative binders in the construction sector. Geopolymer technology has emerged as a sustainable alternative in the construction industry. The lower greenhouse gas emissions of geopolymers compared to Portland cement offer significant potential, especially against climate change. Extensive research has been conducted on the use of waste materials and industrial by-products in the production of Portland cement to reduce environmental impact and promote sustainability. These studies have aimed to develop new binding systems by partially or fully replacing traditional Portland cement with by-products having pozzolanic properties, such as fly ash, ground granulated blast furnace slag, and silica fume.

Fundamentally, silica-rich and alumina-rich sources and pozzolanic materials form the basis of geopolymer technology. These sources are the building blocks that enable the formation of Si-O and Al-O bonds. The properties and proportions of these materials are the most critical factors determining the final properties of geopolymers. When reactivated with chemical activators in an alkaline environment, these materials provide a sustainable alternative binding system to traditional cement production. Fly ash and slag-based geopolymers have been the subject of extensive research and practical applications worldwide. These materials have significant potential for recycling industrial waste and developing sustainable construction materials. In contrast, pumice-based geopolymers are a relatively unexplored area. The limited number of scientific studies on this topic worldwide indicates that pumice-based geopolymers have great potential for structural utilization. This situation presents a

significant opportunity for researchers to work on and investigate pumice-based geopolymers. Especially in regions where pumice is abundant and locally available, such studies can be of great importance both scientifically and industrially.

This study investigated the mechanical performance and durability of alkali-activated mortars based on fly ash and slag containing different proportions of basaltic pumice powder. The mechanical performance and durability were evaluated under curing conditions of 7, 28, and 56 days, with 8M, 12M, and 16M sodium hydroxide concentrations, at temperatures of 200, 400, and 600°C, and in 5% sulfuric acid and 5% magnesium sulfate solutions. Compressive strength, flexural strength, and ultrasonic pulse velocity tests were performed to determine the macroscopic changes caused by high temperatures and exposure to 5% sulfuric acid and 5% magnesium sulfate. In addition, scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analyses were conducted to observe microscopic differences in the samples.

The study found that the addition of basaltic pumice powder decreased the compressive strength of mortars. Increasing the amount of sodium hydroxide (NaOH) and extending the curing period increased the compressive strength. The lowest strength was observed in mortars containing 50% pumice and cured for 7 days, while the highest strength was achieved in pumice-free mortars cured for 56 days. It was understood that pumice-containing mortars require longer curing times to reach their full potential due to the longer time required for the pumice particles to fully react. Although the increase in the amount of NaOH generally increased the strength, it had a limited effect on the strength loss of mortars exposed to high temperatures. This situation indicates that 8M NaOH concentrations may be more suitable in terms of economy. The addition of pumice up to 30% has shown that it can be used without significantly reducing the strength of mortars against high temperature effects. These results support that pumice is a suitable additive material for high temperature resistance in slag and fly ash-based alkali-activated mortars. Compressive strengths exposed to 5% sulfuric acid and 5% magnesium sulfate showed that the strength loss decreases as the pumice content increases. This effect becomes more pronounced with 50% pumice substitution. Strength loss is due to the degradation of alumina-silicate bonds due to 5% sulfuric acid and magnesium sulfate exposure. Pumice-containing samples exhibited better durability performance than the pumice-free samples, while

12M geopolymer samples perform better than 8M and 16M samples in 5% sulfuric acid and 5% magnesium sulfate environments.

Keywords: Geopolymer, durability, basaltic pumice, fly ash, slag, elevated temperatures, sulfuric acid, magnesium sulfate, alkali solution, Alkali-activated mortars



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY	iv
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ	xiii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Jeopolimerlerin Tanımı ve Tarihsel Geçmişi	7
1.2. Jeopolimer Bileşimi	9
1.3. Jeopolimer mekanizması	10
1.4. Jeopolimerlerin Uygulama Alanları	12
1.5. Jeopolimer özelliklerini etkileyen faktörler	14
1.6. Jeopolimer Avantajları.....	16
1.7. Bağlayıcı Malzemeler	18
1.7.1. Pomza	19
1.7.1.1. Pomza Kullanım Alanları	22
1.7.1.2. Pomzanın Sınıflandırılması.....	23
1.7.1.2.1. Bazaltik pomza özellikleri	24
1.7.1.2.2. Pomzanın dayanımlarına etkisi.....	24
1.7.2. Uçucu Küller	27
1.7.2.1. Uçucu kül sınıfları.....	28
1.7.2.2. Uçucu kül kullanım alanları.....	29
1.7.3. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	31
1.7.3.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi	32
1.7.3.2. Yüksek fırın cürufun kimyasal bileşimi ve hidrasyon düzeneği.....	33
1.7.3.3. Yüksek fırın cürufu beton özellikleri üzerindeki etkisi	34
1.7.4. Alkali Aktivatörler	35
1.7.4.1. Sodyum silikat	35
1.7.4.2. Sodyum Hidroksit	36
1.8. Jeopolimerlerin Kullanılması ile İlgili Literatür Çalışmaları	36
1.8.1. Jeopolimerlerin basınç ve eğilme dayanımlar üzerine çalışmaları.....	36
1.8.2. Jeopolimerlerin asit ve sülfatlara karşı dırabilitesi.	39
1.8.3. Jeopolimerlerin yüksek sıcaklık direnci	41
1.8.4. Molarite konsantrasyonunun jeopolimer üzerindeki etkisi	43

İKİNCİ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Geopolimer Malzemeler ve Karışım Oranları.....	46
2.2. Numunelerin Hazırlanması ve Kür Koşulları	48
2.3. Yapılan Deneyler	53
2.3.1. Yüksek Sıcaklık Deneyleri	53
2.1.1. Kimyasal Durabilite Deneyleri	54

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	55
3.2. Kontrol Numunelerinde Yapılan Test Sonuçları.....	57
3.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçları.....	57
3.2.2 Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	60
3.2.3 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	62
3.3. Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Numunelerinde Yapılan Test Sonuçları	64
3.3.1 Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Sonuçları	64
3.3.2 Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	68
3.3.3 Yüksek Sıcaklık Sonrası Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	72
3.3.4 Yüksek Sıcaklıkta Ağırlık Kaybının İncelenmesi.....	75
3.3.5 Yüksek sıcaklıktan önce numunelerin mikro yapısal incelenmesi	80
3.3.6 Yüksek sıcaklıktan sonra numunelerin mikro yapısal incelenmesi	85
3.4. Kimyasal Durabilite Etkisine Maruz Numuneler Yapılan Test Sonuçları.....	88
3.4.1 Kimyasal Durabilite Sonrası Görsel İnceleme Sonuçları	88
3.4.2 Kimyasal Durabilite Sonrası Ağırlık Değişimi Sonuçları	91
3.4.3 Kimyasal Durabilite Sonrası Basınç Dayanımı Sonuçları	94
3.4.4 Kimyasal Durabilite Sonrası Eğilme Dayanımı Sonuçları	98
3.4.5 Kimyasal Durabilite Sonrası Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	100
3.4.6 Kimyasal Durabilite Sonrası SEMve EDS Sonuçları	104
SONUÇLAR	109
KAYNAKÇA	113
ÖZGEÇMİŞ.....	128

KISALTMALAR

ASTM	:	Amerikan Standartları
a	:	Küp Numunenin Uzunluğu
b	:	Numune Eni
C	:	Çimento
CH	:	Kalsiyum Hidroksit
CSH	:	Kalsiyum Silika Hidrat
d	:	Numune Yüksekliği
DK	:	Doğal Kum
g	:	Gram
k	:	Katsayı
kg	:	Kilogram
lt	:	Litre
M	:	Metre
MPa	:	Mega Paskal
N	:	Kırılmaya Neden Olan Yük
ÖP	:	Öğütülmüş Pomza
SD	:	Silis Dumanı
TS	:	Türk Standartları
UPV	:	Ultrases Geçiş Hızı
UK	:	Uçucu Kül
g/cm³	:	Gram/santimetreküp
N/mm²	:	Newton/milimetrekare
Na	:	Sodyum
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
Na₂SiO₃	:	Sodyum Silikat
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
Na₂SiO₃	:	Sodyum Silikat
XRD	:	X Işını Kırınım Yöntemi
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
YFC	:	Yüksek fırın cürufu
CaO	:	Kalsiyum oksit

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Uluslararası Alanda Öne Çıkan Çimento Üreticileri ve Üretim Miktarları, Milyon Ton	5
Tablo 1.2. Jeopolimerlerde Si/Al Oranına Göre Uygulama Alanları.....	13
Tablo 1.3. Dünyadaki Pomza Kaynakları	20
Tablo 1.4. Ülkemizde Üretilmiş Uçucu Kül Mineralojisi	29
Tablo 2.1. Bazaltik Pomza, F-Tipi Uçucu Kül ve Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.	48
Tablo 2.2. Geopolimer Harçlarda Kullanılan Malzeme Miktarları (g/l).....	53
Tablo 3.1. Numunelerinin Birim Hacim Ağırlıkları (g/cm ³).....	55
Tablo 3.2. Kontrol Numunelerinin Farklı Günlerdeki Ortalama Basınç Dayanımları (Mpa).....	58
Tablo 3.3. Kontrol Numunelerinin Farklı Günlerdeki Ortalama Eğilme Dayanımları (Mpa).....	61
Tablo 3.4. Kontrol Numunelerinin Farklı Günlerdeki Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (m/s)	62
Tablo 3.5. Yüksek Sıcaklık Sonrası Geopolimer Harçların Basınç Dayanımı Sonuçları (Mpa).....	64
Tablo 3.6. Yüksek Sıcaklık Sonrası Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımı Sonuçları (Mpa).....	69
Tablo 3.7. Yüksek Sıcaklık Sonrası Geopolimer Harçların Ortalama Ultrases Geçiş Hızı (Upv) Değerleri	73
Tablo 3.9. 56 Günlük Geopolimer Numunelerin Eds Sonuçları	84
Tablo 3.10. 600°C Sıcaklıkta Maruz Kalan Geopolimer Numunelerin Eds Sonuçları	87
Tablo 3.11. %5 Sülfürik Asit ve Magnezyum Sülfat Sonrası Numune Ağırlıklarındaki Değişim	91
Tablo 3.12. Geopolimer Harç Numunelerinin %5 Sülfürik Asit ve %5 Magnezyum Sülfat Sonrası Basınç Dayanımları	95
Tablo 3.13. Geopolimer Harç Numunelerinin %5 Sülfürik Asit ve %5 Magnezyum Sülfat Sonrası Eğilme Dayanımları.....	99
Tablo 3.14. Geopolimer Harç Numunelerinin %5 Sülfürik Asit ve %5 Magnezyum Sülfat Sonrası Ultrases Geçiş Hızı (Upv) Değerleri	102
Tablo 3.15. Kimyasal Durabilite Sonrası Pomza İçermeyen Geopolimer Numunelerin Eds Sonuçları	107
Tablo 3.16. Kimyasal Durabilite Sonrası %50 Pomza İçeren Geopolimer Numunelerin Eds Sonuçları	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2015 Senesinde Kabaca Dünyada Çimento Üretim Miktarları	6
Şekil 1.2. Avrupa’da Çimento Üretimi Sebebiyle Karbondioksit Salınımı.....	6
Şekil 1.3. Çimento Sektörünün Maliyet Bileşenleri	6
Şekil 1.4. Poli (Sialatların) Yapıları.....	6
Şekil 1.5. Jeopolimerizasyon Süreci	11
Şekil 1.6. Pomza Dünya Üretim Payı Grafiği.....	21
Şekil 1.7. Bazik ve Asidik Pomzanın Görünümü	23
Şekil 2.1 Geopolimerin Malzemeleri.....	49
Şekil 2.2. Numunelerin Karışımı ve Dökümü	50
Şekil 2.3. Numunelerde Upv Testi, Yüksek Sıcaklık Uygulaması ve Mekanik Dayanımları.....	51
Şekil 2.4. Numuneler Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	52
Şekil 3.1. Geopolimer Numunelerinin Ağırlıkları (G).....	57
Şekil 3.2. Kontrol Numunelerinin Farklı Günlerdeki Ortalama Basınç Dayanımları (Mpa).....	59
Şekil 3.3. Kontrol Numunelerinin Farklı Günlerdeki Ortalama Eğilme Dayanımları (Mpa).....	61
Şekil 3.4. Kontrol Numunelerinin Farklı Günlerdeki Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (M/S).....	61
Şekil 3.5. Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerin Farklı Günlerdeki Basınç Dayanım Değerleri (Mpa)	65
Şekil 3.6. Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerin Farklı Günlerdeki Eğilme Dayanım Değerleri (Mpa)	70
Şekil 3.7. Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerin Farklı Günlerdeki Ultrases Geçiş Hızı (Upv) Değerleri.....	74
Şekil 3.8. 200°C Sıcaklık Maruz Bırakıldıktan Sonra Numunelerin Ağırlıkları	77
Şekil 3.9. 400°C Sıcaklık Maruz Bırakıldıktan Sonra Numunelerin Ağırlıkları	78
Şekil 3.10. 600°C Sıcaklık Maruz Bırakıldıktan Sonra Numunelerin Ağırlıkları	80
Şekil 3.11. 56 Günlük Geopolimer Numunelerin Sem Mikrografları	82
Şekil 3.12. 600°C Maruz Bırakıldıktan Sonra Numunelerin Sem Mikrografları	86
Şekil 3.13. 56 Gün Boyunca %5 Sülfürik Asit ve %5 Magnezyum Sülfat Etkilerine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerin Görsel İncelenmesi	90
Şekil 3.14. 56 Gün Boyunca Sülfürik Asit ve Magnezyum Sülfat Etkilerine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerde Ağırlık Değişimi %.....	93
Şekil 3.15. 56 Gün Boyunca Sülfürik Asit ve Magnezyum Sülfat Etkilerine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerde Basınç Dayanımlarının Değişimi %	97
Şekil 3.16. 56 Gün Boyunca Sülfürik Asit ve Magnezyum Sülfat Etkilerine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerde Eğilme Dayanımlarının Değişimi %	100
Şekil 3.17. 56 Gün Boyunca Sülfürik Asit ve Magnezyum Sülfat Etkilerine Maruz Kalmış Geopolimer Numunelerde Upv Değerlerinin Değişimi %	103

Şekil 3.18. Kimyasal Durabilite Sonrası Geopolymer Numunelerin Sem Mikrografları	
.....	106



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her sayfasında değerli yardım ve ilgisini esirgemeyen, bilimsel araştırma projesi kapsamında yürütülmesini sağlayan, yönlendirici ve bilgilendirici desteklerinden dolayı danışman hocam Sayın **Doç. Dr. Anıl Niş'e** özellikle teşekkürlerimi sunarım. Her şeyden önce, benimle bir ağabey gibi ilgilendiğiniz için minnettarım. Sizden aldığım destek ve rehberlik, bu süreçte bana büyük bir güç verdi.

Yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca yardım, bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan inşaat bölümündeki tüm saygıdeğer hocalarıma teşekkür ederim.

Inşaat bölümündeki tüm saygıdeğer hocalarıma teşekkür ederim.

Güzel aileme, bana verdiğiniz tüm destek ve destekler için derin şükranlarımı sunmak isterim. Her zaman bana ilham kaynağı oldun ve kariyerimde beni hiçbir zaman yalnız bırakmadın. Annem ve babam **Prof. Dr. Salah Wahhab Shakir**, bana verdiğiniz koşulsuz sevgi ve rehberlik için teşekkür ederim. Bana çok çalışmanın ve kararlılığın değerlerini öğrettin. Kardeşlerim, diş hekimi **Yaseen Salah Wahhab** ve Kız kardeşim diş hekimi **Aya salah Wahhab** sizler benim en iyi arkadaşlarımsınız, hayatımın her anına destek olduğunuz ve katıldığınız için teşekkür ederim. Bu harika ailenin bir parçası olduğum için gurur duyuyorum.

Sevgili dostum ve yol arkadaşım inşaat mühendis **Murtaza Kazım'a**, Bu çalışmanın hayata geçmesinde gösterdiğiniz destek ve katkılar için içtenlikle teşekkür ederim. Seninle birlikte geçirdiğimiz zamanlar, bana ilham kaynağı oldu ve bu süreçteki en büyük destekçim oldun. Bilgeliğin ve azmin, benim için her zaman bir rehber oldu. Bu tezdeki başarı, yalnızca benim değil, senin de katkılarınla mümkün oldu. Her şey için tekrar teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana yardım etmekten çekinmeyen sevgili inşaat mühendis arkadaşlarım **Mustafa Kamel** ve **Nour Ezz El-Din'e** şükranlarımı sunuyorum.

Altaqadum Laboratuvarı'nda pratik deneylerimi yapmama izin verdiği için sevgili mühendis arkadaşım **Miqdam Hatem'e** şükranlarımı sunmak isterim.

GİRİŞ

Portland çimentosunun (OPC) üretim süreci atmosfere büyük miktarda CO₂ salınımına neden olur. Üretilen her bir ton geleneksel Portland çimentosu üretilmesinde yaklaşık bir ton CO₂ salınır ve bu da sera gazı emisyonlarına ve küresel ısınma olgusuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Çimentonun zararlı etkileri, puzolanik özelliklere sahip tarımsal, endüstriyel ve belediye atıkları da dahil olmak üzere alternatif bağlayıcıların yaygın olarak benimsenmesine yol açmıştır. Jeopolimerler veya alkali aktive edilmiş malzemeler olarak bilinen bu alternatif bağlayıcı malzemeler, ilk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından öncülük edilmiştir. Daha sonra, alkali aktive edilmiş malzemelerin temel unsurları ve yapıları, jel oluşumları ve malzemeleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Assi, Lateef, Anay, Rafal, Leaphart, Davis, Soltangharai, Vafa, & Ziehl, Paul, 2018) (Çevik & Niş, 2023) (Niş, et al., 2024) (Niş & Bilenler Altundal, 2023).

Jeopolimerlerin çimentoya göre daha az sera gazı emisyonu yaratması, özellikle iklim değişikliğiyle mücadelede büyük bir potansiyel taşımaktadır. Portland çimentosunun üretiminde, sürdürülebilirlik ve çevresel etki azaltma hedefiyle atık malzemeler ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımı üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak puzolanik özelliklere sahip, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi yan ürünlerin kısmi veya tam ikamesi ile yeni bağlayıcı sistemler geliştirilmesini amaçlamıştır. Buradaki amaçlardan bir tanesi jeopolimerlerin yapıların inşasında kullanılabilmesi için gerekli yönetmeliklerin ve standartların önünü açmaktır. Böylece çimentonun hem çevreye verdiği zarar azaltılabilecek hem de daha ekonomik bir beton üretimine katkı sağlanabilecektir. Özellikle çimento üretimi sırasında çok yüksek enerji maliyetleri engelleneceği için, enerji gereksinimini de azaltmasına katkı sağlayacaktır.

Günümüzde CO₂ salınımı Portland çimentosuna göre %80-90 oranında daha az olan yeni nesil bağlayıcı malzeme bilim insanları tarafından araştırılmaya başlanmıştır. 1979 yılında ilk kez Davidovits tarafından jeopolimerler olarak isimlendirilen bu yeni teknolojik malzemenin günümüzde Portland çimentosuna alternatif olabileceği düşünülmektedir. Çevreye pozitif etkisinin yanında sanayi yan ürün rezervlerini dengeleme, tek tip doğal kaynaklara olan bağımlılığı azaltma

(özellikle çimentoya olan bağımlılık), daha yüksek durabilite sağlama gibi pek çok pozitif etkiye sahiptir. Bu nedenle geopolimerler günümüzde araştırmacıların dikkatini çekmiştir (Albayrak, 2023). Geopolimer harçlar, kristal veya amorf yapıya sahip olabilirler. Dayanım, durabilite ve kimyasal direnç gibi özellikleri açısından doğal kayaca benzerlik gösteren, yüksek enerji tüketimi gerektirmeyen doğal veya yapay atıklar kullanılarak üretilirler (Davidovits J. , Inorganic Polymeric New Materials, 1991). Geopolimer harcın oluşum prosedürleri, ortamdaki karbondioksit emisyonlarını (CO_2) azaltmanın ve Portland çimentosu üretimine göre enerji kullanımını en aza indirmenin etkili yolları arasındadır (Rashad, 2014). Geopolimer bağlayıcılar sıradan Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında; karbondioksit kirliliğini azaltma, düşük malzeme maliyeti, atık malzemelerin daha kolay entegrasyonu ve daha düşük hammadde tüketimi gibi olumlu özelliklere sahiptir. Ayrıca mekanik olarak da erken yaşta iyi dayanım, düşük sünme, düşük büzülme, yangına ve kimyasal saldırılara iyi tepki vermenin yanı sıra doğaya çok daha düşük seviyede zarar verme gibi birçok olumlu özelliğe sahiptir. Bu özellikler geopolimer bağlayıcının, standart beton çimentosuna göre sürdürülebilir bir alternatif malzeme olmasını sağlamaktadır (Tuntaş, 2023).

Geopolimerlerin 2 esas gereksinimi vardır: kaynak malzemeleri ve alkali aktivasyon çözeltisi. Kaynak malzeme, kimyasal yapılarında alümina-silikat içermelidir ve bu malzemeler doğal kaynaklardan (örneğin, pomza ve kaolinit) veya atık yan ürünlerden (örneğin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül) temin edilebilir (Davidovits J. , 2013). Temel olarak, silika-alümina bakımından zengin kaynaklar ve puzolanik malzemeler, geopolimer teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Bu kaynaklar, Si-O ve Al-O bağlarının oluşumuna olanak sağlayan temel yapı taşlarıdır. Bu malzemelerin özellikleri ve oranları, geopolimerlerin nihai özelliklerini belirleyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Kimyasal aktivatörlerle birlikte alkaline ortamda yeniden aktive edilen bu malzemeler, geleneksel Portland çimentosu üretimine alternatif sürdürülebilir bir bağlayıcı sistem sunmaktadır. Düşük kalsiyuma sahip uçucu kül (F tipi) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruf esaslı geopolimerler, dünya genelinde kapsamlı araştırmalara ve pratik uygulamalara konu olmuştur. Özellikle demir-çelik atığı olan cüruf malzemesi ve yine benzer şekilde termik santral atığı olan düşük kalsiyum içerikli uçucu küller eğer beton içerisinde kullanılmazlarsa bu malzemeler etraftaki arsalarla dökülerek veya toprağa gömülerek bu malzemeden

kurtulma yolları aranmasına sebep olurlar. Benzer şekilde bu taşıma ve gömme maliyetleri de bu malzemelerin bertarafı için sorun teşkil etmektedir. Buna ek olarak, eğer bu malzemeler arsalara gelişigüzel bırakıldıklarında rüzgâr gibi etkenlerden dolayı havaya karışıp havayı kirletmektedirler. Dolayısıyla bu malzemelerin beton içerisinde kullanımı hem çevre hem de ekonomi açısından fayda sağlamaktadırlar. Bunun yanı sıra bu malzemeler, endüstriyel atıkların geri dönüşümü ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadırlar. Buna karşılık, pomza esaslı jeopolimerler henüz yeterince çalışılmamış bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya genelinde bu konuda çok az sayıda bilimsel çalışma yapılmış olması, pomza bazlı jeopolimerlerin keşfedilmemiş bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bu durum, araştırmacılar için pomza esaslı jeopolimerler üzerinde çalışma ve araştırma yapma konusunda önemli bir fırsat alanı oluşturmaktadır. Özellikle pomzanın yerel ve bol miktarda bulunabildiği bölgelerde, bu tür çalışmalar hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan büyük önem taşıyabilmektedir.

Uçucu küller termik santralde enerji üretimi amacıyla linyitin ve taşkömürün yakılması ile bacada filtre vasıtasıyla tutunan atık bir malzemedir. Yakıt için kullanılan kömür tipi, santralin cinsi ve yanış biçimi v.b unsurlar uçucu külün üretim sürecini etkilemektedir. Termik santralde elektrik enerjisinin üretimi esnasında taş kömürü miktarının %10 ile 15'i, linyit kömürü miktarının %20 ile %50'si küle dönüşmektedir. Bu şekilde oluşan külün %80'i civarı baca gazı vasıtasıyla kazanlardan ayrıldıktan sonra oluşan malzeme uçucu kül olacak şekilde ortaya çıkmaktadır. Termik santralde uçucu kül tutunması amacıyla yüksek standarda sahip elektro-filtreler kullanılır (Erdoğan G. , 2022). Genelde ortaya çıkan bu uçucu kül malzemesi bağlayıcı olarak karışımıza çıkmaktadır (Feng, X. & Clark, B., 2011).

Pomza, yüksek silika ve alümina içeriğiyle öne çıkan, volkanik kökenli doğal bir puzolan malzemedir. Dünya'da bol miktarda bulunan pomza, jeopolimer beton üretiminde ekonomik ve sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Kabay, N., Tufekci, M. M., Kizilkanat, A. B., & Oktay, D., 2015; Tapan, M., Depci, T., Özvan, A., Efe, T., & Oyan, V., 2013; Mamaseni, 2021) tarafından yapılan çalışmalarda, pomzanın jeopolimer beton üretimindeki potansiyeli vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, farklı oranlarda bazaltik pomza tozu içeren uçucu kül ve cüruf bazlı alkali aktifleşmiş harçların, 7, 28 ve 56 günlük kütleme süreleri, 8M, 12M ve 16M sodyum hidroksit konsantrasyonları, 200, 400 ve 600°C sıcaklıklar ve %5

sülfürik asit ile %5 magnezyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılma koşullarında elde edilen mekanik dayanım ve durabilite performansları bu çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı testleri, yüksek sıcaklıklar ve asit ile sülfat etkisinden kaynaklanan makro ölçekteki değişimleri tespit etmek için uygulanmıştır. Ayrıca, numunelerde mikro ölçekteki farklılıkları gözlemek için taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve enerji dispersif X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Elde edilen bulgulara bazaltik pomza tozu kullanımının geopolimer numunelerde bağlayıcı olarak kullanılabildiği görülmüştür. Ayrıca bazaltik pomza tozu kullanımının mekanik dayanım ve durabiliteye etkisi, pomza tozu ikamesinin ve NaOH molaritesinin değişmesiyle beraber değiştiği gözlemlenmiştir. Özellikle bazaltik pomza tozu kullanımı hem sülfürik asite hem de magnezyum sülfat etkisine karşı iyi bir dayanım gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, pomza tozu ikamesi geopolimer numunelerin üretiminde yüksek fırın cürufu ve uçucu kül yerine bağlayıcı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

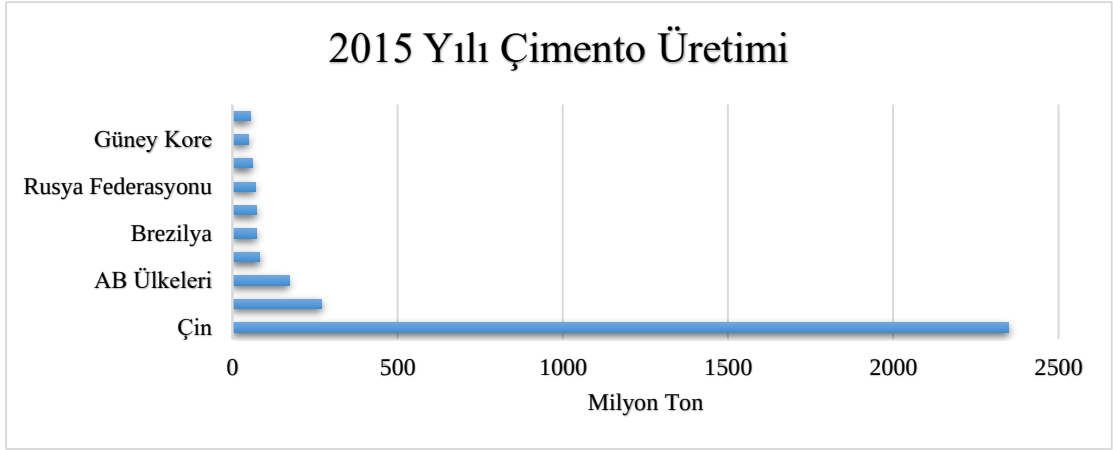
Çimento endüstrisi, herhangi bir ülkenin ekonomik göstergesinde belirleyici bir faktördür. Fakat çimento üretim süreci çevre faktörü ve üretim masrafı gibi negatif özelliklere de sahiptir. Bu nedenler çimentonun yerine yeni nesil bağlayıcı türüne olan ihtiyacı her geçen gün daha da artırmaktadır. Bu nedenle taban külü, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi bünyesinde silika, alümina ve kalsiyum oksit içerikli amorf malzemeler alkali solüsyonlarla aktive edilerek yeni nesil, çevreci ve sürdürülebilir bir bağlayıcı üretmek mümkündür. Alümino-silikat içeren uçucu külün alkali solüsyonlarla tepkimesi nihayetinde “jeopolimer” isimli amorf yapıya sahip inorganik polimer oluşurken, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun tepkimesi sonrasında kalsiyum silikat hidrat oluşur (Aydın, 2010).

Çimento üretim sürecinde en büyük iki olumsuz CO₂ salınımı ve büyük enerji maliyetidir. Dünyada en fazla çimento Çin’de üretilmektedir, Tablo 1.1. Fakat ülkemiz 2015 senesinde çimento üretim faaliyetlerinde Çin, Hindistan, ABD ve Brezilya’dan daha sonra 72.8 milyon ton ile beşinci sırada (Şekil 1.1) mevcut olmaktadır (Cembureau, 2015). Yakın gelecekte bu rakamın daha da artacağı düşünülmüşse atmosfere yayılan karbondioksit miktarında büyük artışın olacağı beklenmektedir (Şekil 1.2). Diğer taraftan çimento endüstrisinde yüksek maliyete sebebiyet veren yakıtların kullanılması da (Şekil 1.3) çimento üretiminde diğer bir problem olarak ortaya çıkmaktadır (Atabey, 2017).

Tablo 1.1. Uluslararası alanda öne çıkan çimento üreticileri ve üretim miktarları, milyon ton

Ülkeler	2001	2009	2012	2015
Çin	661	1644	2137	2350
Hindistan	103	205	239	270
AB Ülkeleri	226	209	171	172
ABD	89	64	74	83
Brezilya	39	52	68	73
Türkiye	30	54	64	73
Rusya Federasyonu	29	44	53	69
Japonya	80	60	59	60
Güney Kore	52	50	47	49
Suudi Arabistan	20	38	43	54

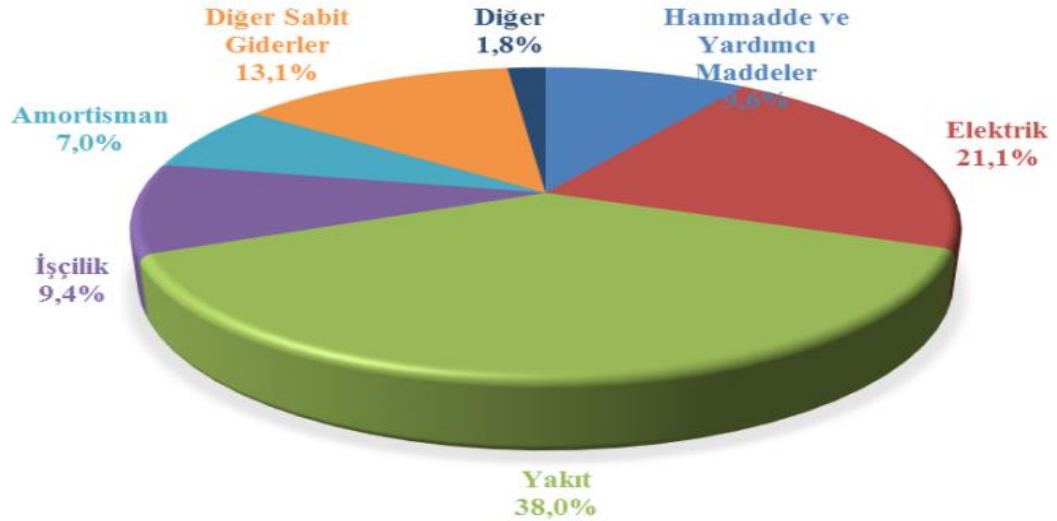
Kaynak: Aydın, 2010.



Şekil 1.1. 2015 senesinde kabaca dünyada çimento üretim miktarları
Kaynak: Aydın, 2010.



Şekil 1.2. Avrupa’da çimento üretimi sebebiyle karbondioksit salınımı
Kaynak: Aydın, 2010.



Şekil 1.3. Çimento sektörünün maliyet bileşenleri
Kaynak: Atabey, 2017.

Gelişmekte olan ülkelerde, sanayi endüstrisinde hammadde bulunması, üretimi ve tüketimi sırasında oluşan atıklar maalesef çevre kirliliği açısından çok büyük bir

tehlike oluşturmaktadır. Fiziksel, biyolojik ve kimyasal hammadde ve atıkların sürdürülebilirlikleri kapsamında ülkeler geri dönüşüm süreçlerini zorunlu tutmasından ötürü firmalar geri dönüşüm işine yavaş yavaş girmektedir. İnşaat sektöründeki süratli ilerlemeye paralel bir şekilde çevre kirliliği açısından sorun teşkil eden birçok atık malzemelerin yapı veya dolgu malzemesi olacak şekilde kullanımı amacıyla imkânların bu konuda kullanılması ve yapılacak araştırmaların bu konular üzerinde yoğunlaşması beklenmektedir (Özcan, 2006) (Mesci, Ergun, & Çakıroğlu, 2007) (Gül, 2018).

1.1. Jeopolimerlerin Tanımı ve Tarihsel Geçmişi

Purdon, alkali cüruf kombinasyonunda ilk önemli ilerlemeyi 1940'ta gerçekleştirdi (Mamaseni, 2021). 1950'lerdeki alkali çimento tarihinin takribî 80 yıllık olduğu söylenebilir. Victor Glukhovsky, zeolit meydana gelmesinin jeolojik yapısını öngörmeye çalışan ilk araştırmacı olarak kabul edilir (Majidi, 2009). "Alkali aktivasyon, sürdürülebilir kaynaklarda bulunan aluminosilikatlar için formüle edilmiştir, ancak tipik olarak atık veya hammadde desteklerinden elde edilir (Glukhovsky, V. D., 1965). İlk olarak, bu modern bağlayıcılar 'toprak silikatları' olarak tanımlanmıştır (Glukhovsky, 1959) ve 1976 yılında jeopolimer prensibi, Joseph Davidovits tarafından alkali aluminosilikat granüller için tescillenmiştir. Jeopolimerlerin ilk tanımlaması ve tanıtımı Davidovits tarafından yapılmıştır. Bir bağlayıcı bileşen grubu olarak, alkali veya alkali-silikat alüminyum silikat malzemelerinin kombinasyonlarının uyarılmasıyla meydana gelmiştir. Alüminosilikat yapısı, oksijen moleküllerini birbirleri ile değiştirerek ilişkili olan SiO_4 ve AlO_4 'nin karmaşık tetrahedral dizilimi içerir. Bu çeşitli adlandırma göz önünde barındırıldığında, bu anlamlar benzer kimya kullanılarak oluşturulan ve esas olarak tekrarlanan sialat monomerik birimlerle şekillenen malzemeleri tanımlar (Mamaseni, 2021).

Jeopolimer terimi genellikle amorf alkali alümina silikası tanımlamak için kullanılır. Daha doğrusu, jeopolimerlerin geliştirilmesi esnasında, inorganik polimerler, alkali ile aktive edilmiş çimento, alkali bağlı seramikler, jeo çimento, toprak çimento, hidro seramikler gibi birkaç terimsel ifadeler kullanılmıştır. Bu terimler, yineleyen bir sialat monomerinin (-Si-O-Al-O-) benzer başlangıç bileşenleri kullanılarak üretilen sentezlenmiş malzemeyi (bağlayıcı) belirlemektedir (Duxson, et

al., 2007) (Davidovits J. , 2013) (Singh, Ishwarya G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S.K., 2015). Jeopolimerizasyona neden olan reaksiyonlar, jeopolimerizasyon olarak isimlendirilir (Davidovits J. , 1994) (Davidovits J. , 2005).

Jeopolimer teknolojisi yeni olarak kabul edilse de kökleri eski zamanlara dayanmaktadır ve Giza piramitleri ile diğer eski yapılar için yapı malzemesi olarak kullanıldığı kabul edilmektedir (Barsoum & Ganguly, A., 2006).

1978'de Fransız profesör Joseph Davidovits, inorganik moleküllerin zincirleri veya ağlarıyla karakterize edilen geniş bir malzeme kapsamını belirlemek için Geopolimer adını ilk olarak kullanan kişi olmuştur (Davidovits J. , 1991) (Davidovits J. , 2005). Alkali aktivatör çözeltisinin kullanımı, üç boyutlu (3D) polisialat zincirlerinin meydana gelmesine sebep oldu (uçucu kül ve cüruf gibi), bu da hidroksilasyon ve poli-kondansasyon reaksiyonların sonucunda ortaya çıkmıştır (Van-Chanh, Trung, B.D. , Van-Tuan, D., & Candidate M.E., 2008).

1979 ile 1995 yılları arasında, Davidovits ve ekibi jeopolimerizasyon üzerine çok sayıda makale yayınladı ve patentler aldı. Bu patentler özellikle bir jeopolimerik bağlayıcı ve bir silika-alüminat mineral polimerinin geliştirilmesine yer vermektedir (Komnitsas & Zaharaki, D., 2007).

Geopolimer üzerine yapılan araştırmalar 1990'ların sonlarında hızlandı ve yapılan birçok araştırma projesi, bildirisi, makalesi bu çalışmaların bir ürünü olarak meydana gelmiştir (Provis, Palomo, A., & Shi, C., 2015). Dünya genelinde gerçekleştirilen araştırma çabaları, Portland çimentosuna benzer koşullarında olduğu gibi kullanılabilirlik kullanıcı dostu jeopolimer çimentosunun üretimini hedeflemektedir (Davidovits J. , 2008). Yalnızca, jeopolimer çimentosunun bazı dezavantajları bu malzemelerin yapıların inşasında kullanımını engellemiştir. Bunlar arasında yönetmelik standart eksikliği, işleme riski, maliyetler (özellikle alkali aktivatör maliyeti) ve bulunabilirlik bulunmaktadır (Okonkwo, Onodagu, P. D., & Ubani, O. U, 2019).

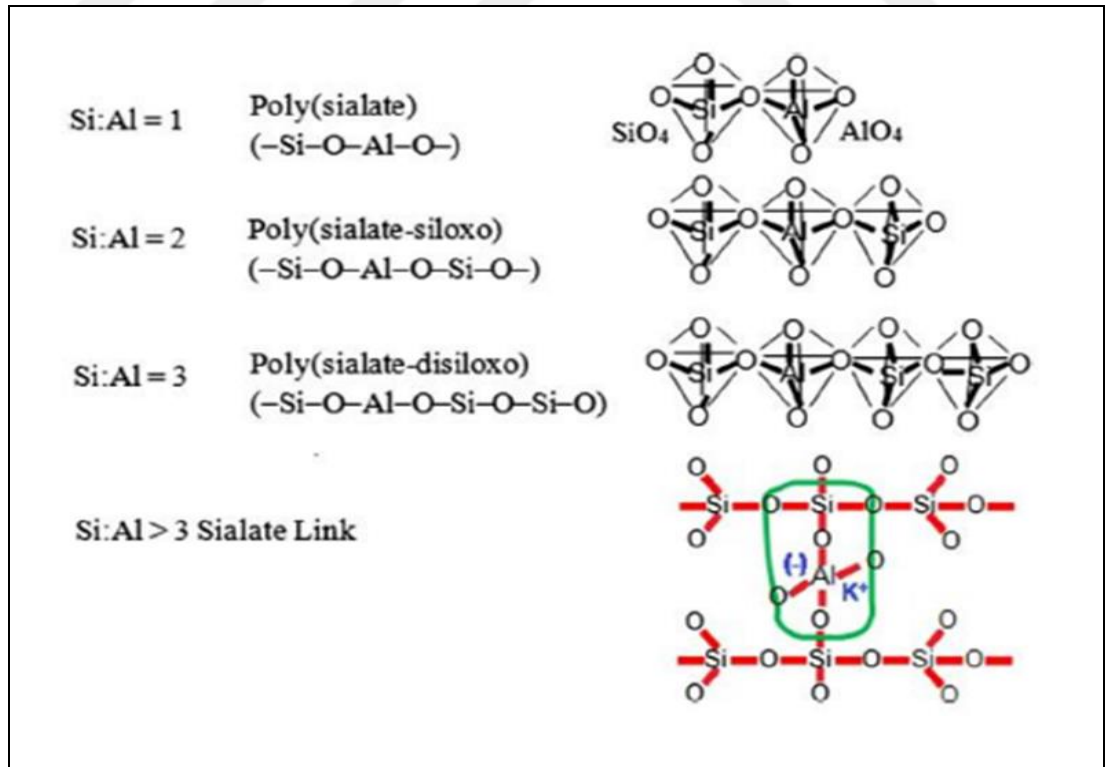
Jeopolimer, farklı kür koşullarında çeşitli formülasyonlarla üretilen geniş bir aluminosilikat ürün kapsamını ifade etmek amacıyla kullanılan yaygın bir tanımdır. Jeopolimer, beton altyapısı, tarım, seramik ve yangına dayanıklı malzemeler gibi farklı alanlarda gerçekleştirilmiştir (Aljanabi, 2021). Jeopolimer, çeşitli kür programları altında geniş bir aluminosilikat malzeme kapsamından üretilmektedir. Silika ve

alümina bakımından zengin olan aluminosilikat kaynakları, uçucu kül ve cüruf gibi yan ürün malzemeleri veya kalsine edilmiş kil gibi doğal malzemeler olabilir (Shayan, 2016).

1.2. Jeopolimer Bileşimi

Jeopolimerlerin kimyasal tanımını yapmak için, Davidovits (1988) “poly-(sialat)” terimini tanıttı. Sialat, silikon-oks-aluminatın kısaltılmış formudur. Sialat ağı, oksijen atomlarını paylaşarak bağlanmış SiO_4 ve AlO_4 dörtgen yüzlülerinden oluşur. Siloksanat ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$) veya sialat ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$) gibi tekrar eden bileşenlerden oluşurlar, bu birimler tipik olarak seramik, kovalent bağlı, kristal olmayan (amorf) 3D ağlar polikondensasyon ile oluşturulur, alkali iyonlar ise boşluklar içindeki elektrik yüklerini dengelemeye çalışmaktadır.

Davidovits'in (2008) belirttiğine göre, Si/Al oranının (Si/Al) jeopolimer yapısı üzerinde önemli bir tesiri vardır. Beton uygulama süreçlerinde yaygın olarak kullanılan jeopolimer malzemeler çoğunlukla 2 ila 3.5 arasında bir Si/Al oranına sahiptir. Si/Al oranına göre, jeopolimerin yapısı üç temel yapıya bölünebilir, Şekil 1.4'te belirtildiği gibi (Washington, DC Patent No. U.S. Patent No. 8,202,362., 2012).



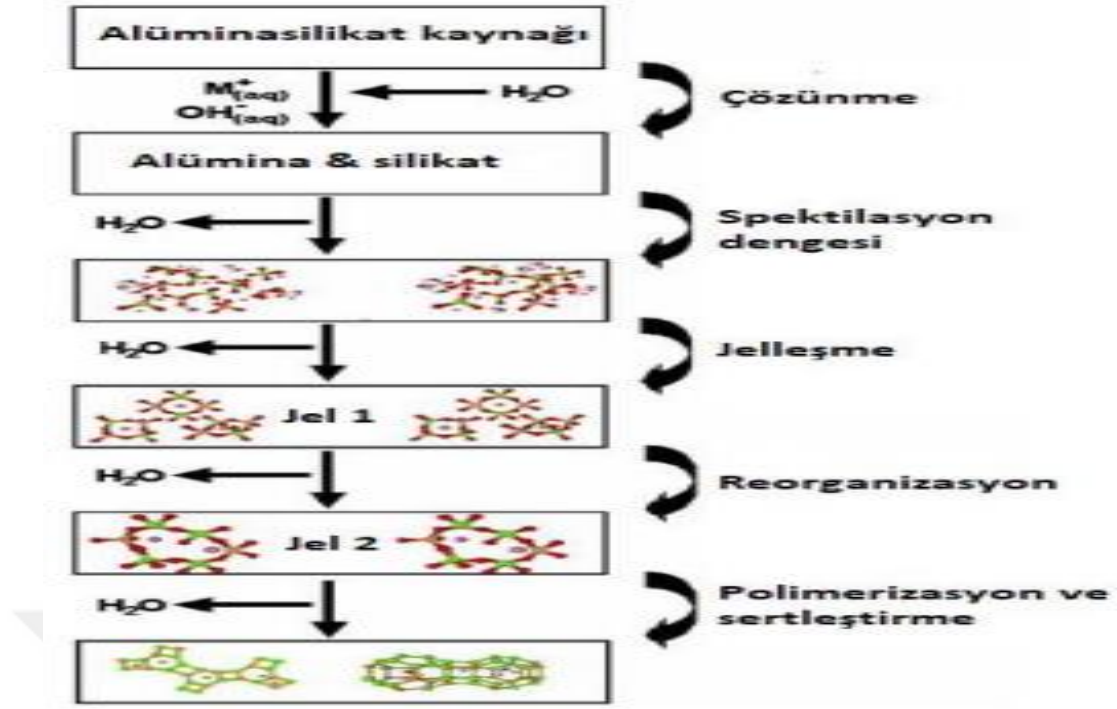
Şekil 1.4. Poli (sialatların) Yapıları

Kaynak: Liew, Heah, C. Y., & Kamarudin, H., 2016.

1.3. Jeopolimer mekanizması

Jeopolimer üretim sürecinde yüksek silika ve alümina içeren farklı malzemelerin kullanımı mümkündür. Hammadde olarak, kalsine killeri, doğal mineraller, endüstriyel atıklar, cüruf, uçucu kül, atık cam ve kırmızı çamur gibi yan ürünler veya bu maddelerin karışımı kullanılabilir. Bu malzemelerin içeriğindeki CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 içeriklerine göre bağlayıcıların dayanım ve durabilite performansları değişmektedir. Özellikle yüksek fırın cürufundaki CaO basınç ve eğilme dayanımları olumlu etkilerken, düşük kalsiyum içeriklere sahip uçucu küllerde CaO oranı düşük olmasından ötürü basınç dayanımı yüksek olmamaktadır. Dolayısıyla hammaddenin seçilmesi ve hazırlanışı, nihai jeopolimer ürün özelliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu özelliklerin arasında yüksek basınç ve eğilme mukavemeti, düşük termal iletkenlik ve büzülme ve yüksek kimyasal asit durabilitesi kabul edilmektedir.

Jeopolimerizasyon mekanizması, yüksek pH, yoğunlaştırılmış alkaliler, yüksek sıcaklık ve dayanım gerektiren zeolite benzer bir mekanizma olarak tanımlanmıştır (Davidovits J., 1991). İlk aşamada, silis ve alümina içerikli alkali solüsyonlarla aktive edilmiş numune için bir tepkime mekanizmasını ilk olarak Glukhovsky 1967 senesinde ortaya koymuştur (Duxson, et al., 2007). Bu önerilen modelde 3 aşama bulunmaktadır: 1) yıkım ve pıhtılaşma, 2) pıhtılaşma ve yoğunlaşma ve 3) yoğunlaşma ve kristalizasyon. Bu zeolit hakkındaki modeli var olan kaynaklara dayandırarak jeopolimerizasyon mekanizması çok sayıda araştırmacılar vasıtasıyla geliştirilmiştir. Şekil 1.5'te 5 aşamadan meydana gelen jeopolimer reaksiyonları etraflıca açıklanmıştır (Liban, 2022). Öncelikle, kaynak malzemelerin yüksek alkalilerle çözünmesiyle silikat ve alüminat türleri oluşmaktadır. Sonraki aşamada, alüminat-silikat türleri, alümino-silikat çözeltilerini meydana getirmek amacıyla spektilasyon dengesi aşaması sırasında birbiriyle reaksiyona girmektedir. Çözünme aşaması sonrasında reaksiyondan su açığa çıktığı görülmektedir. Daha sonraki aşamada, yüksek Ph ortamında yüksek konsantrasyona sahip çözeltinin oluşması sonrasında jeopolimer adı verilen jellerin üretilmesi gerçekleşmektedir. Bir sonraki aşamadaysa jeopolimerin gözeneklerinin ve iç yapısının geliştiği jel ağının yeniden düzenlenmesi aşamasıdır. En son aşamadaysa 3D bir jeopolimer malzemesi oluşmaktadır. Şekil 1.5 jeopolimerizasyon sürecini anlatmaktadır. (Liban, 2022).



Şekil 1.5. Jeopolimerizasyon süreci

Kaynak: Liban, 2022.

Jeopolimerizasyon reaksiyon mekanizması farklı parametrelerden etkilenmektedir. Bu faktörlerden birincisi ise malzemelerdeki amorf silis ve alümina miktarı, çözünme oranı ve hammaddelerin fiziksel özelliğini içeren alümino-silikat bileşimi ve mineralojidir. Faktörlerden 2. ise silika yoğunlaşması (SiO_2/M_2O), alkali metal katyon türleri, alkali solüsyon yoğunlaşması (H_2O/M_2O) ve su muhtevası (su/bağlayıcı) ile ilgili alkali aktive edici çözümlerdir. Son faktörse sıcaklık, kür süresi ve nem etkisini içeren ortam (kür) koşullarıdır (Olivia & Nikraz, H., 2012). Özellikle kür koşulları dayanım ve durabiliteyi etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Yüksek kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcılarla üretilen geopolimerler kür koşullardan çok fazla etkilenmezken, düşük kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcılarla üretilen geopolimerler kür koşullarından önemli derecede etkilenirler. F-tipi uçucu küller yani düşük kalsiyum içeriğine sahip geopolimer numuneler için yüksek ısı kürüne ihtiyaç duymaktadır. Aksi takdirde eğer normal ortamlarda kür edilirse nihai basınç dayanımları çok düşük olmaktadır.

Jeopolimerlerin karışık bir içyapısı olduğunu belirtmek gerekmektedir. Jeopolimerleri sentezleme yöntemlerinden birisi de alkali bir çözeltiyi reaktif bir alümino-silikat tozuyla genelde uçucu küller ya da metakaolinle birleştirmektedir. Birleşme sonucunda jeller bağlayıcı fazlar olarak bilinen düzensiz alümino-silikat jel

fazlarının ortaya çıkmasını sağlarlar. Oluşan jellerin bağlayıcı fazı içlerinde, reaksiyona girmeyen katı parçacıklar bulunmaktadır. Oluşan jellerin gözenekleri, öncülerin karıştırılması sırasında kullanılacak suyu içermektedir. Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinden ayrı olarak bulunan su, jeopolimer bağlayıcıların kimyasal yapısının ayrılmaz bir kısmını oluşturmazlar ve dolayısıyla hem avantaj hem de dezavantajları bulunmaktadır. Oluşan jellerin ana çerçevesi, her bir alüminat tetrahedrondaki bir veya daha fazla köprü oksijeninde lokalize olan ve alkaliyle dengelenecek 4 kat koordinasyonda Al^{3+} sebebiyle negatif yükle yüksek oranlarda bağıntılı 3D bir alüminat ve silikat tetrahedra ağıdır. Alkali Aktive edici çözeltiler tarafından sağlanan metal katyonlardır (Provis & Van Deventer, 2009). Bu şekilde üretilen jeopolimer bağlayıcılar hakkında yapılan çalışmalar halen devam etmekte olup, özellikle farklı durabilite ve farklı malzemelerde bu kimyasal yapının hangi oranda değiştiği araştırılmaktadır.

1.4. Jeopolimerlerin Uygulama Alanları

Jeopolimer malzemeler doğru alkali çözeltiler ile kullanıldıklarına pek çok önemli avantaja sahip olabilmektedir. Özellikle sodyum silikat ve hidroksit ile üretilen jeopolimer harçların basınç dayanımları yüksek seviyelerde bulunmaktadır. Yine bu jeopolimer harç numunelerin yüksek sıcaklık ve yangın direnci açısından geleneksel Portland çimentosuna benzer ve hatta daha üstün özellikler göstermektedir. Geleneksel Portland çimentolu betonların karşılaştığı en kötü problemlerden birisi de asit saldırılarıdır. Jeopolimer numuneler asit direnci açısından da yüksek performans göstermektedir. Jeopolimer malzemeler ısı kararlılığına sahip malzemelerdir ve bu malzeme özellikleri üzerinde bazı parametreler önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler SiO_2/Al_2O_3 oranı, alkali aktifleştirici yoğunluğu, kür süresi ve kür sıcaklığı, su/katı oranı ile pH değeridir. Bahsedilen parametreler jeopolimerizasyon sürecinde aktif rol oynayarak, oluşan nihai ürünün dayanım ve durabilite performansları açısından iyi özellik göstermesinde aktif rol oynarlar. Jeopolimer malzemeler dekoratif taşlar, ısı yalıtım malzemeleri, refrakter malzemeler, uçak içi ile otomobilleri güçlendiren yüksek teknolojiye sahip altyapılar için kompozitler, yüksek teknolojiye sahip reçine sistemleri, radyoaktif ve toksik atıkların muhafazası gibi malzemelerde ve uygulamalarda geniş çapta kullanılmaktadır (Koçak, 2023). Şu ana kadar yapılan çalışmalarda jeopolimerlerin taşıyıcı sistemlerin inşasında kullanılabilmesi için gerekli yönetmeliklerin ve standartların olmayışı, bu

malzemelerin kullanımı sınırlamaktadır. Dolayısıyla geopolimer betonlar birçok avantaj içerdiğinden dolayı araştırmacıların daha çok ilgisini çekmektedir. Geopolimer betonlarının dikkat çeken en önemli avantajları üretiminde karbondioksit (CO₂) emisyonunu azaltması ve özellikle yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerlerde erken dayanımlarının yüksek olması olarak belirtilebilir. Son yıllarda alüminosilikat reaktif malzemelerden olan uçucu kül ya da granüle yüksek fırın cürufundan üretilen geopolimer ürünlerinin özelliklerini açığa çıkarmak amacıyla kapsamlı araştırmalar uygulanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda geopolimer betonların yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Yine benzer şekilde, geopolimer numuneler üzerinde yapılan çalışmalardan birisi de geopolimer numunelerde farklı oranda tipte ve uzunlukta liflerin kullanımı ile ilgilidir. Geopolimer numunelerde lif kullanılmasıyla beraber, betonların tokluk değeri ve darbe dayanımı değerleri lifsiz numunelere göre daha yüksek bulunmaktadır (Asrani, et al., 2019).

Geopolimer malzemelerinin uygulanma biçimi, kimyasal bileşenler tarafından, polisialattaki Si/Al atomik oranı olarak belirlenir. Davidovits (1999), uygulama şeklini Tablo 1.2’de verilen Si/Al oranlarına göre kategoriye ayırmıştır. Si/Al oranının 1 ile 3 arasında olması tuğla, seramik, yangın koruması vb. uygulama alanlarına sahiptir. Si/Al oranının çok yüksek olması ise (>15) ateşe ve ısıya dayanıklı fiber kompozit uygulanmasında kullanılmaktadır. Tablodan anlaşılabileceği gibi İnşaat mühendisliğinin uygulama alanlarındaki pek çok uygulamalarda daha düşük Si/Al oranları kullanımı nispeten daha uygun bulunmaktadır (Kartal, 2019).

Tablo 1.2. Geopolimerlerde Si/Al oranına göre uygulama alanları

Si/Al oranı	Uygulama alanları
1	Tuğlanın üretilmesinde
	Seramiklerde
	Yangın direnci gerekli yerlerde
2	Düşük karbondioksit emisyonuna sahip çimento ve betonlarda
	Radyoaktif madde ve zehirli atıkların kapsüllenmesinde
3	Yangın korumaya sahip fiber-cam kompozitlerin ekipmanlarında
	Isıya dayanıklı kompozit üretiminde
	Havacılık alanlarında
>3	Endüstride sızdırmazlık gereken yerlerde
	Havacılık SPF alüminyum takım üretimlerinde
20-35	Ateşe ve ısıya dayanıklı fiber kompozitlerde

Kaynak: Kartal, 2019.

Geopolimerler amorf inorganik yapıya sahip olduklarından termal izolatör gibi alanlarda kullanılabildikleri için iyi bir termal dayanıklılığa sahiptirler. Özellikle son senelerde Avustralya'da; kanalizasyon boru hatlarında, demir yolu traverslerinde, yangına ve kimyasala dayanıklı duvar panellerinde, duvar ünitelerinde, koruyucu kaplamalarda ve onarım malzemelerinde, püskürtme betonlarda ve yüksek performanslı sahip elyaf takviyeli laminatlar ile birlikte inşaat endüstrisinde kullanılmaktadır (Gourley J. T., 2003) (Gourley J.T. & Johnson G.B., 2005).

Jeopolimerlerin, özellikle düşük kalsiyum içerikli (uçucu kül ve metakaolin gibi) üretilen geopolimerlerde kalsiyum oksitinin çok düşük olması nedeniyle deniz suyuna karşı geleneksel Portland çimentolu betona göre daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Yine Hangzhou Bay (Shanghai) 'daki beton yüzeylerde denize maruz kalan betonlar için korozyon koruyucu kaplama olarak uygulanmıştır (Zhang Z., Yao X., & Zhu H., 2010 a) (Zhang Z., Yao X., & Zhu H., 2010 b).

Sonuç olarak geopolimer bağlayıcı sistemler;

- ❖ Prefabrik taşıyıcı eleman olarak,
- ❖ Prefabrik taşıyıcı olmayan eleman olarak,
- ❖ Kimyasal ve toksik etkilere maruz kalan yerlerde,
- ❖ Yüksek sıcaklığa maruz kalan yerlerde termal yalıtım malzemesi olarak,
- ❖ Refrakter malzeme üretiminde yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmektedir.

1.5. Jeopolimer özelliklerini etkileyen faktörler

Geopolimerlerin özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biri kür yöntemi ve kür sıcaklıklarıdır. Aynı zamanda kür süresi, sodyum hidroksite yoğunlaşması, su oranı da geopolimer niteliklerini yüksek ölçüde etkilemektedir. Ortam sıcaklıkta başlayan geopolimer reaksiyonu karışım tamamlandıktan sonra 40–100°C sıcaklıkta ısıtma işlemine tabii tutulursa, polimerik reaksiyonlar artmaktadır. Dolayısıyla meydana gelecek geopolimer numunelerin dayanımı ısıtma işlemiyle beraber daha da artmaktadır. Geopolimer oluşum sürecindeki kürlenme işlemi, geopolimer harçların alkali aktivasyonlar esnasındaki reaksiyonların hızlanması bakımından önem taşır. Ayrıca alkali aktivasyonların reaksiyonları esnasında su oranı mühim bir faktördür. Kürlenme sırasında mevcut nemin, alkali aktivasyonları yapılmış harçlar ve betonların yapısal ve mekanik özelliklerine üzerine etkisi olduğu belirgin bir şekilde

anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra gerçekleştirilen çalışmalara bakımında kür sıcaklıkları özellikle uçucu küller ile üretilmiş geopolimer numunelerde reaksiyon hızlandırıcı etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek ısı kürü ile beraber uçucu küllerin kısa zamanda basınç dayanımı çok yüksek hale gelmektedir. (Kütük, N, 2013) (Villa C., Pecina E.T., Torres R., & Gómez L., 2010).

Kür koşullarının geopolimer numunelere olan etkisini araştıran araştırmacılar kür süresi bakımından 4 ile 48 saat, kür sıcaklığı bakımından ise 40°C ile 80 °C aralığında sıcaklık koşullarında yapılan ısı kürleri geopolimerizasyon oluşumu için yeterli olmaktadır. Bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda kürleme yapıldığında oluşacak geopolimer dayanımında artışı sağlanmayabilir. Daha önce yapılan bir araştırmada farklı sıcaklıklarda kür koşulları incelenmiş ideal kür sıcaklık derecesinin 60 ° C olduğunu ifade etmiştir. Oda sıcaklığı referans alınırken kürleme sıcaklık yükseldikçe geopolimer numunelerin basınç, çekme ve eğilme dayanımları da yükselecektir. Ama kürleme sıcaklık 60 ° C den yüksek olduğu zaman geopolimer numunelerde basınç dayanımının azaldığı rapor edilmiştir (Bakri A., et al., 2011).

Kürleme işlemi yapılırken numuneler direk yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamalıdır yoksa numunelerde çatlak oluşma ihtimali artmaktadır. Geopolimer numunelerin ısı kürü esnasında fırın ortam ısısı başlangıç seviyesinden itibaren dikkatlice ölçülü bir şekilde yükseltilerek kürleme sürecinde istenilen sıcaklığa ulaşılmalıdır. Bu sebepten dolayı hızlı sıcaklık değişimine uğrayan geopolimerler bünyesindeki suyu oldukça hızlı bir şekilde dışarı atarak (buharlaşarak) inçe büzülme çatlaklarına sebep olmaktadır ve bu büzülme çatlaklarında özellikle geopolimer numunelerin durabilite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Yaşın, 2010). Diğer taraftan geopolimer bünyesindeki mevcut su miktarı, geopolimer jellerinin yapısını ve madde karakteristiklerini belirgin derecede etkilemektedir. Bağlayıcı malzemeler alkali çözelti ile birleştirildiğinde reaksiyon aynı zamanda çözünme-hidroliz ve hidroliz-polikondenzasyon şeklinde iki aşamada meydana gelir. Bu aşamalarda suyun varlığı gereklidir. Eğer karışımdaki su miktarı fazlaysa geopolimerizasyon hızı azalmaktadır. Bunun yanı sıra su geopolimerizasyon esnasında mutlaka kullanılması gerekip Al^{3+} - Si^{4+} iyonların ve katı partiküllerin çözünmesi için büyük önem taşır. Geopolimerizasyon reaksiyonlarını etki edilen faktörlerden biri de sıvı/katı miktarıdır (Irfan Khan M., Azizli K., Sufian S., & Man Z, 2015) (Kütük, N, 2013). Bu miktar büyük olduğu sürece reaksiyonlar hızlıca olurlar. Ama su,

geopolimerizasyonun 2. adamada olması gerekenden fazla miktarda olduğunda polikondenzasyon reaksiyonları negatif zara görür. Sıvı/katı miktarı düşük seviyedeysen polikondenzasyon hızını fazla olur. Örnek olarak sıvı/katı miktarı 1 ile 1.5 olan iki sistem incelenecek olursa, 1 oranı sahip sistemde polikondenzasyon sistemi hızlıca olmaktadır. Diğer taraftan su miktarı numunelerinin çatlak olmaması için mühimdir. Kütleme esnasında çatlak oluşturmaması için numuneler yeterli miktarda su barındırmalıdır. Buna ek olarak özellikle sodyum hidroksit alkali aktivatör ile üretilen geopolimer numunelerde sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonu artarken geopolimerizasyon hızı ve miktarı yükselir. Sodyum hidroksite konsantrasyonun fazla miktarda bulunması kalsinasyonu hızlıca faaliyete geçiriartırmaktadır. Saf su OH^- anyonu dâhil etmediği müddetçe bu sonuç ortaya çıkmamaktadır. Fazla alkalilik hammaddelerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Bazik ortam hammaddelerinin etkin hale gelmesi için kâfi seviyede olmalıdır lakin bu şartlarda su miktarına göre polikondenzasyon hızında değişiklikler olabilir. Büyük molarite konsantrasyonu kullanımı ile hidroliz artabilir fakat polikondenzasyon engellenebilir.

Sinterleme aşamasının hedefi, geopolimerindeki boşlukların azalması için gereklidir. Bu olay esnasında karbonatların ayrışma sıcaklığı olan 500 °C sıcaklığın altında oluşan reaksiyonlar gözeneklerin yapısının daha iyi olmasını sağlayabilir. Geopolimer çalışmalarında geopolimer malzemeye kalsit ekleyerek gözeneklilik değerlerinin yükselmesi sağlanmıştır (Kesler, 2009) (Kurt, 2016).

1.6. Jeopolimer Avantajları

Geopolimerler kireç ve Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil bağlayıcı olarak tanınmaktadır. Bununla birlikte geopolimerler, düşük karbondioksit emisyonuna sahip olmasından ve üretiminde ısı işlem gerektirmemesinden sebebiyle Portland çimentosuna alternatif çevre dostu bir yeni nesil bağlayıcılar olarak tanınmaktadır. Geopolimer malzemeler CO_2 emisyonlarını düşürmenin yanında yüksek fırın cürufu gibi alüminosilikat reaktif atık malzemenin tekrar kullanılabilir hale getirilmesini sağlamaktadır. Yüksek fırın cürufu geopolimer üretiminde kullanılarak ekonomiye de bir fayda sağlanır (Alnkaa, 2019). Heterojen bir malzeme olan betonun diğer yapı malzemelerine göre kullanımının kolay olması kritik bir rol oynamaktadır. Portland çimentosu genelde konvansiyonel beton bileşenlerinden biri

olmaktadır. Portland çimentosu üretimi, yükselen talebe ve artan nüfusa bağlı olarak artmaktadır. Buna bağlı olarak Portland çimentosu üretimi esnasında atmosfere yayılan karbondioksit gazı oranı da yükselmektedir. Portland çimentosu üretim sürecinde her bir ton üretim için atmosfere yaklaşık olarak bir ton civarında karbondioksit gazı salgılanması söz konusu olmaktadır. Çimento üretim sürecinde önemli konulardan biri de doğal kaynak tüketiminin oldukça yüksek olmasıdır. Bundan dolayı kirliliği minimuma düşürmek ve doğal kaynak tüketimini sınırlayabilmek için yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve pomza gibi alüminosilikat reaktif malzemeler çimento yerine kullanımı konu olmaktadır. Ayrıca yüksek fırın cürufu yeni nesil bağlayıcı üretimi olarak adlandırılan geopolimer üretiminde ısı kürü uygulanmadan kullanılabilmesi sebebiyle dikkat çekmektedir (Yalghuz, M. R., 2020). (Altındal, 2020) Yaptığı bir çalışmaya göre geopolimerlerin avantajlarını şu şekilde açıklamışlardır:

- ✚ Hammadde kaynaklarının çevrede oldukça bulunabilmesi: Suda çözünebilen silikatlar yeryüzünde fazlasıyla mevcuttur. Geopolimerler hem fabrika atıklarından hem de doğal puzolanlardan üretilmektedir. Genel olarak geopolimerler, endüstriyel atıkları (yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi) geri dönüşüm konseptinde buluşturan çevre dostu olan ürünler olarak bilinmektedir.
- ✚ Sürdürülebilir enerji kullanımı: Jeopolimer üretiminde, enerji fazla tüketilmez. Doğal olarak bulunan alümino-silikatların düşük rölatif sıcaklıklarda (600- 800°C) ısıtıl işlemi, Portland çimentosunun harcadığı enerjinin (yaklaşık 1500°C) 3/5'ini kullanarak uygun geopolimer hammaddeleri sağlar ve dolayısıyla daha az enerji gerektirirler. Bu da enerjinin çimento üretimi yerine daha farklı alanlarda kullanılmasını mümkün kılar.
- ✚ Kolay geopolimer beton hazırlama: Jeopolimer betonlar, alümino-silikat reaktif malzemelerin, kuvvetli alkali çözeltilerle düzenli karıştırılmasıyla kolaylıkla üretilir. Kısa zamanda önemli bir dayanım ve durabilite performansı elde edilmektedir.
- ✚ Çatlak kontrolü: Geopolimerler düşük reaksiyon ısısına sahip olmalarından ötürü geleneksel betonlara göre daha az çatlar.
- ✚ Erken dayanıklılık: Geopolimer betonlar, uygun bağlayıcı ve alkali aktivatör seçimi ve doğru ısı kürü uygulaması ile yüksek erken dayanıma ulaşırlar.

Geopolimer betonların içerisinde bulunan alkali aktifleştircilerin erken reaksiyonu sonucunda ve ısı kürü de uygulanarak 3-8 saat gibi kısa bir sürede oldukça yüksek basınç dayanımı değerlerine çıkılabilmektedir.

- ✚ Mukavemet: Geopolimerlerin nihai basınç dayanımı değerleri oldukça yüksektir. Yüksek basınç dayanımı için özellikle yüksek fırın cürufu yüksek CaO içeriğine sahip olmasından dolayı kullanılmaktadır.
- ✚ Yüksek sıcaklığa karşı durabilite: Geopolimerler yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliklerine sahiptir. Geopolimerle üretilen numunelerde geleneksel Portland çimentolu numunelere göre yüksek sıcaklıktan daha az etkilenmektedir.
- ✚ Uygun maliyet: Geopolimer betonu üretiminde ihtiyaç duyulan malzemeler endüstriyel atıklar olabileceği için maliyetten önemli bir tasarruf sağlanmış olur. Dolayısıyla geopolimerler geri dönüşüm konseptini avantaja çeviren yeni nesil bir bağlayıcı türüdür (Altındal, 2020).

1.7. Bağlayıcı Malzemeler

Geopolimerlerin iki temel ihtiyacı vardır ve bunlar bağlayıcı malzemeler ve alkali aktivatör solüsyonlarıdır. Seçilen bağlayıcı malzemeler kimyasal içeriğinde alümina-silikat içermelidir ve bu malzemeler ya doğal kaynaklardan ya da atık yan ürünlerden kullanılabilmektedir (Davidovits J. , 1999) (Xu, H. & Deventer, J. S. J., 2000) (Duxson, et al., 2007) (Lloyd, N., & Rangan, V, 2010) (Davidovits J. , 2013) (Singh, N. B. & Middendorf, B., 2020) (Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R., 2020).

Geopolimerler için doğal kaynaklar, geopolimerlerde katkı maddesi olarak Portland çimentosu bulunmadığı için doğal puzolanlardan veya yan ürün malzemelerinden (yapay puzolan) üretilen sentetik alümino-silikat geopolimer üretimi sırasında meydana gelebilir. Diğer taraftan geopolimerik silikon-oksijen-alüminyum bileşimine sahip mineral bağlayıcılar ve doğal puzolanlar volkanik kaynaklıdır. Örneğin; kaolinit, pomza, süngertaşı, killeri, perlit vb. doğal puzolanları, silika dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerde yapay puzolanları içerir (Güneyisi, 2004). Ayrıca küresel tedarik zincirinde modern bir kaya olan pomza, giderek artan bir şekilde daha dikkat çekici, genel kabul görmüş ve son yıllarda Türkiye’de daha fazla kullanılmaya başlamıştır (Yildiz & Ugur, L. O., 2009).

1.7.1. Pomza

Bir alüminosilikat madde olarak pomza; çeşitli reaktif bileşenler kullanılarak inorganik bağlayıcı maddelere çevrilebilir (Almalkawi, A. T., Hamadna, S., & Soroushian, P., 2017). Pomzanın jeopolimer harçların kaynak bileşenlerden biri olarak kullanılmasını sağlayan temel bileşenler; pomzanın jeopolimer ürünlerinde daha sürdürülebilir olması, uygun maliyetli olması ve alümina-silika içeriği yüksek doğal bir puzolanik malzeme olmasıdır. (Gündüz, 2001) (Gündüz L. & Şapcı N., 2005) Son zamanlarda pomza kullanılarak üretilen jeopolimer harçlar üzerinde çalışmalar artmaktadır (Hossain, 2003) (Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Kani, E. N., 2008) (Kani & Allahverdi, 2011) (Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R., 2015) (Nadoushan, M. J. & Ramezaniyanpour, A. A., 2016) (Robayo-Salazar, Arcila, J. M., & Gutiérrez, R. M., 2017) (İbrahim, M., Johari, M. A. M., Rahman, M. K., Maslehuddin, M., & Mohamed, H. D., 2018b) (Occhipinti, R., ve diğerleri, 2020) (Hamid, Yaltay, N., & Türkmenoğlu, M., 2021).

Basıncın artmasıyla birlikte magma içindeki erimiş gazlar asidik madde ile birlikte bacadan patlama biçiminde püskürür. Hızlı basınç tahliyesi ve ani genişlemeler yaratır. Bu arada uçan bileşiklerin bacadan aniden çıkışına sebep olmaktadır. Arda kalan eriyik küre şeklinde parçacıkların atmosfer ile teması sonucu ani soğumaya maruz kalırlar. Böylece pomza oluşmaktadır ve volkanik aktiviteden sonra yanardağın krateri zamanla krater gölüne dönüşebilir. Aynı zamanda pomzanın oluşmasını sağlayan faktörlerin arasında; püskürmenin süresi, ara süre, magmanın ısısı, magmanın eriyik gaz oranı ve püskürülmüş malzemelerin soğuma zamanıdır. Oluşan pomza parçacıkları, volkanik baca etrafından uzak mesafelere hava yoluyla birikir. Böyle durumda pomza yatağı oluşur ve bu birikintiler bir süre sonra nehirler yoluyla taşınıp elverişli havzada depolanabilmektedir. Bu yolla oluşmuş çökellerde %1 ile %3 oranlarında andezit, trakitandezit, bazalt, obsidiyen v.b. volkanik kaya parçacıklarına rastlanır (Toregaliyev, 2022) .

Pomza, volkanik olaylar neticesinde meydana gelmiş, sünger şeklinde ve boşluklara sahip, kimyasal ve fiziki tepkilere dirençli, gözeneklere sahip camsı bir volkanik kayaç türüdür. Pomzanın ortaya çıkışı sürecinde içeriğindeki gazları hızlı bir şekilde bırakarak ani soğuma sonucunda fazla sayıda gözenek oluşumu meydana gelir. Pomza gözeneğe sahip ve B.H.A yaklaşık 500 kg/m³'tür. Pomzanın boşluk ve gözenekleri sayesinde sese ve ısıya karşı yalıtım görevi görür. Pomza bünyesindeki

gözeneklerin birbiri ile bağlantısının olmaması sayesinde hafif, suda yüzen, geçirimsizliği düşük, ses ve ısı yalıtımı yüksek bir malzemedir. Pomzanın yapısı sayesinde hem sıcak hem de soğuk havalarda izolatör görevi görmektedir. Mors skalası pomza sertliğini 5-6 civarında göstermektedir. Pomzanın hassas ve camsı yapısı yüzünden kırılğan bir yapısı vardır. Pomza bünyesinde yaklaşık %75 oranlarına varan silis bulunmaktadır. Yine benzer şekilde pomza bünyesinde yaklaşık %15 oranında Al_2O_3 vardır (Acer, 2018) (Dolgun, 2010).

Volkanik oluşumlarda asidik pomza, bazik pomzaya göre daha viskozdur ve yüksek oranda silis içermektedir. Bazik pomzanın sıvı olduğu sıcaklıkta asidik pomza katıdır. Bu nedenle volkanik faaliyetler durduğunda pomza akışı da durmakta ve asidik kayalar ve kütleler oluşmaktadır. Bu olay, bir yanardağın genel aktivite özelliğini göstermektedir (Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ., & Çankıran, O., 1998).

Asidik özellikleri olan pomzanın SiO_2 oranı bazaltik pomzaya kıyasla fazladır ve dolayısıyla inşaatta kullanılması daha yaygındır. Bazaltik özelliklere sahip pomzalarda kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve demir içerikleri daha fazladır. Bu sebepten ötürü, farklı endüstri sahalarında daha fazla kullanılmaktadır (Şengün, 2004).

Tablo 1.3. Dünyadaki pomza kaynakları

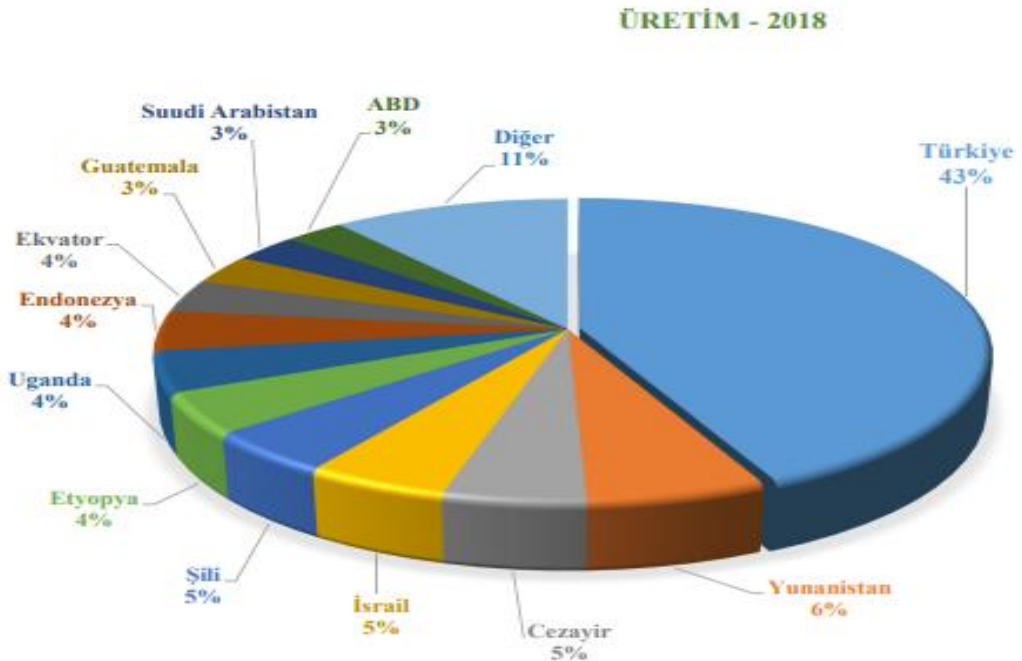
Ülkeler	Miktar (Milyon Ton)
Kuzey Amerika	12000
Orta Amerika	80
Güney Amerika	80
Türkiye	2836
İtalya	2000
Avrupa	5336
Avusturalya	500
Dünya Toplam	17996

Kaynak: Yazıcıoğlu, Arıcı, E., & Gönen, T., 2003.

Türkiye’de bulunan pomzaların miktarı çok fazladır. Özellikle Nevşehir bölgesinde çok fazla miktarda pomzaya rastlanmaktadır. Bu malzemeyi farklı endüstrilerde değerlendirmeye çalışan ülkelerden bazıları; ABD, Türkiye, İtalya, Almanya, İzlanda, Yunanistan ve Fransa’dır. Dünyadaki bütün pomzanın 17 milyar tondan daha fazla olduğu rapor edilmektedir (Yanık, 2007) (Erkoyun, 2005). Böyle bir miktara sahip pomzanın yapıların inşasında bağlayıcı olarak kullanımının önünün açılması, bu ve daha başka alanlar için yol gösterici nitelikte olabilir.

Pomza daneleri genişledikçe dane özgül kütle değeri düşmektedir. Benzer şekilde pomza dane büyüklüğü artarsa gözeneklerin miktarı da artış göstermektedir. Pomza malzemesi gözenekliliğinin artışı ve dolayısıyla pomzanın azalan özgül ağırlığı, izolasyon malzemesi olarak kullanımını sağlamaktadır. Yüksek gözenekliliği sayesinde, pomza tanelerinin yüksek basınç mukavemeti bulunmamaktadır. Fakat pomza tanelerindeki basınç mukavemeti değerleri duvarların yapılmasında kullanılabilecek taşların mukavemet değerlerinden üstündür. Ayrıca, pomzanın ısı izolasyonu özelliği sayesinde beton daha ince harç kullanılarak yapılabilir. Pomza daneleri arasında bulunan boşlukların hem izolasyon hem de ses absorbe edici özelliği bulunmaktadır. Öğütülen pomza dolgu malzemesi, sabun ve kozmetik sanayi kullanımlarında birden çok farklı alanda kullanıma olanak tanımaktadır (Reyhanoğlu, 1988).

Son zamanlarda yayımlanan bir rapora göre, 2020 senesinde dünyadaki pomza üretimi yaklaşık 18 milyon tondur. Raporda bulunan 2018 senesi verilerine göre; 7,8 milyon tondan fazla pomza üretimi ile Türkiye 1. sırada bulunmaktadır. Sonrasında, Yunanistan 1,1 milyon ton, İsrail ve Cezayir 900 bin ton, sonrasında Şili 800 bin ton ile takip etmektedir. (Eroğlu & Şahiner, 2020).



Şekil 1.6. Pomza dünya üretim payı grafiği
Kaynak: Eroğlu & Şahiner, 2020.

1.7.1.1. Pomza Kullanım Alanları

Ülkemizde ve dünyada pomza en fazla inşaat sektöründe bims yapımında kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise, gözenekli yapısı sayesinde hem ses hem de ısıya karşı izolatör görevi görmesidir. Buna ek olarak, pomzayla üretilmiş betonların yangın performansları geleneksel Portland çimentolu betonlara nazaran %20 oranında daha fazla olduğu rapor edilmektedir. Benzer şekilde bimslerin hafifliği sayesinde nakliyesinin de ekonomik olduğu göz ardı edilmemelidir. Pomzayla üretilmiş geleneksel Portland çimentolu betonlar diğer betonlarda nazaran daha az yük getirdiklerinden daha az deprem kuvvetlerine maruz kalmakta ve bu da onları depreme karşı daha dirençli hale getirmektedir. Ayrıca pomza beton agregası olarak kullanıldığında, kırılmadan büyük deformasyon yapabilme yetenekleri sayesinde, deprem bölgelerinde önemli şekil değiştirme kapasitesi sağlayacağı düşünülmektedir. Gerçekleştirilen birçok araştırmada, pomzayla üretilmiş betonların donma-çözünme dirençlerinin, geleneksel betonların donma-çözünme dirençlerinden daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ., & Çankıran, O., 1998) (Şengün, 2004).

Pomza genel olarak inşaat sektöründe beton veya biriket üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Eğer kullanılacak pomza bağlayıcı özelliği gösterirse ısı ve ses avantajının yanı sıra dayanım artırıcı bir unsur olarak ta kullanılması mümkün olabilmektedir. Fakat bunun olabilmesi için gerekli yönetmeliklere ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca pomza kullanılarak farklı ürün gelişimi ve ürün çeşitliliğin sağlanması sayesinde farklı tipte malzemelerin üretilmesine yardımcı olabilir. Pomza daha çok araştırmalarda agrega yerine kullanılmakta olup, bu malzemenin bağlayıcılık özelliği çok irdelenmemiştir. Pomza hafif agrega olarak kullanılabileceği gibi, kimyasal bileşimindeki yüksek oranda silis içermesinden dolayı puzolanik özelliği gösterip bağlayıcı olarak kullanılabilmesi de mümkündür. Bunun yanı sıra pomza bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilmektedir (Acer, 2018). Yapılan başka bir çalışmada %15-%25 oranlarında pomzanın dolgu olarak kullanımı ASTM standardına göre uygun olabileceği belirtilmiş olup, daha yüksek oranlarda pomza kullanımının dayanım değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir. Buna ek olarak pomza zemin stabilizasyonunda da kullanılabilmektedir (Yıldırım, 2007).

Ayrıca pomza bünyesindeki gözenekler ve bunların birbiri ile bağlantısı olmadığından dolayı normal betonlara nazaran 6 kat daha yüksek ısı yalıtımı,

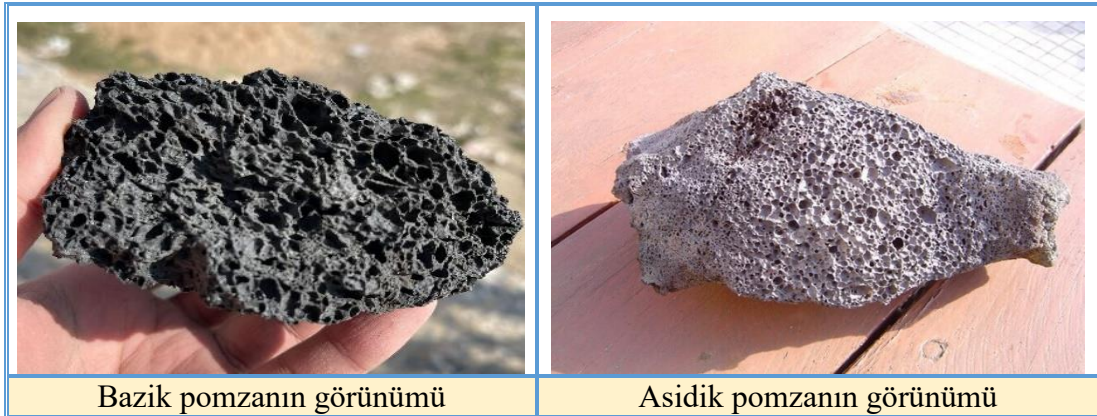
geleneksel sıva ile kıyaslandığında ise 4 kata kadar yüksek ses yalıtımı göstermektedir. Pomza yapıların inşasında kullanılan tuğlaların üretimi için de hammadde olarak uygulanabilmektedir (Dolgun, 2010) (Yıldırım, 2007).

1.7.1.2. Pomzanın Sınıflandırılması

Pomza bir volkanik kaya türüdür ve volkanik aktiviteler sonrasında asidik ve bazaltik özelliklere sahip iki farklı pomza tipi meydana gelmektedir. Genelde camsı bir yapısı bulunmaktadır. Bunlardan asidik olanın rengi beyaz renkli olup, bazaltik (Scoria) olanın rengi ise daha siyahımsı bir renge sahiptir (Erdoğan Y. , 2007).

Asit pomzasından farklı olarak, bazaltik pomzanın büyük ve bağlı vezikülleri bulunmaktadır ve bünyesinde daha az SiO_2 ihtiva etmektedir. Düşük silis içeriğinden ötürü, bazaltik pomza rengi kahverengi ve siyaha yakın bir renge sahiptir (Taddeucci, J, 2015). Bazaltik pomza, dolgu maddesi ve filtre malzemesi olarak, mimari uygulamalara ek olarak, hafif betonların üretilmesinde farklı endüstriyel alanlarda, ısı ve ses izolatörü olarak kullanılabilmektedir (Hossain Anwar K.M., 2009) (Toregaliyev, 2022).

Asit pomzasının yoğunluğu ise bazaltik olandan daha düşük olmakta ve genellikle 0.5 ile 1 gr/cm^3 değerleri arasında değişmektedir. Bazaltik pomzanın yoğunluğuysa 1 ile 2 gr/cm^3 değerleri arasındadır. Hem asidik hem de bazaltik pomza bünyesinde gözenekli yapılar bulunmaktadır. Gözeneklerinin birbirleriyle bağlantılarının bulunmayışı pomzanın en iyi karakteristik özellikleri arasında yer almaktadır (Al-Antaki, 2020). Şekil 1.7’de bazaltik ve asidik pomzanın görünüşü mevcuttur.



Şekil 1.7. Bazik ve asidik pomzanın görünümü

Kaynak: Al-Antaki, 2020.

1.7.1.2.1. Bazaltik pomza özellikleri

Bazaltik pomza, camsı ve amorf yapıda ve yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içerikleri bulunan puzolanik özellik gösteren bir malzemedir. Yüksek oranda silis içermesinden ötürü, alit ve belitlerle reaksiyona girerek C-S-H jellerini oluşturabilirler. Ayrıca, geopolimerizasyonda alkali aktivatör malzemelerle yani sodyum silikat ve sodyum hidroksitlerle reaksiyona girerek C-S-H jellerine ek olarak N-A-S-H jellerini de oluşturabilirler. Yüksek oranda silika içermesi bir yana içeriğindeki reaktif alümina varlığından dolayı C-A-H oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girmektedirler (Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D., 2003). Genelde puzolanik tepkime sonucu gelişen ürünler yavaştır, bileşimdeki portlanditi kullanır, boşluk ve poroziteyi doldurmakta oldukça aktif rol oynamaktadır (Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M., 2006) (Toregaliyev, 2022).

Bazaltik pomzanın puzolanik reaktivitesinin artması için daha ince daneye sahip olması yani özgül yüzey alanının daha fazla olması gerekmektedir. Dane boyutu incelidikçe, puzolanik aktivite artmakta ve elde edilen dayanım ve durabilite özellikleri daha da iyileşmektedir. Bazaltik pomzanın özgül yüzey alanı değişik yöntemlerle belirlenebilmektedir. En çok kullanılan yöntemlerden birisi, sıkışmış parçaların hava akımına olan dirençlerini belirleyen Blaine'e özgül yüzey alanı metodudur. Buna ek olarak bazaltik pomzaların özgül yüzey alanlarının belirlenebilmesi amacıyla lazer parça boyut analizörü de kullanılabilmektedir (Ramezaniapour, 2014). Yapılan araştırmalar neticesinde, incelikte oluşan her $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ artış dayanımı yaklaşık 5 MPa artırmaktadır. Bu aktivedeki artış, öğütme sonrasında gövdedeki camsı yapının kırılması, parça büyüklüğünün düşmesi ve bazaltik pomzanın çözünme hızını artırması dolayısıyla meydana gelmektedir (Shi, 2001) (Toregaliyev, 2022).

1.7.1.2.2. Pomzanın dayanımlarına etkisi

Pomzanın bağlayıcı malzeme olmasından ötürü, bağlayıcı indeksi yüksektir. Puzolanlar, bünyesindeki silis ve alüminlerin ince taneli olarak birleşip, su ile karıştırılması sonucu kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanırlar (Ersoy A., Atıcı U. , & Yünsel T. Y., 2005). Çimentonun içine %50 oranlarında ilave edilen puzolonlar kırma ve öğütme işlemi sonrasında aktiviteyi artırmaktadır. Çok ince daneli pomza katkısıyla üretilen çimentolar TSE standartları özelliklerine göre uygunluk sağlamaktadır. Çimentonun hidrate olması esnasında

puzolanların tepkimesi sonucunda açığa çıkan kireç serbest kalmaktadır. Puzolonların bünyesinde mevcut olan silikatla kirecin tepkimeye girmesi sonucunda bağlayıcılık özelliğine sahip malzeme oluşmaktadır. Genel olarak yapay ve doğal puzolanik malzemeler kalsiyum silikat hidrat jellerine göre zayıf olan kalsiyum hidroksiti bağlayarak daha kararlı bir yapıya sahip kalsiyum silikat hidrat jelini oluşturur (Ersoy A., Atıcı U. , & Yünsel T. Y., 2005). Dolayısıyla daha ince öğütülen pomzalarla kalsiyum hidroksit reaksiyonu sonucu çok daha kararlı bileşikler meydana getirirler. Öğütülen pomzalarla üretilen beton numunelerin basınç mukavemetlerinin çimento miktarının azalmasıyla beraber, başlangıçta referans betonundan daha düşük mukavemetlere sahip oldukları bilinmektedir. Fakat ileriki yaşlarda uygun kür ile beraber basınç mukavemetlerindeki düşüş azalarak, aradaki farkın çok daha düşük kalacağı belirtilmektedir. Uygun miktarda ince pomzalar betonların üretilmesinde çimentonun yerine ikame edilirse, özellikle 3 ay kür uygulanmış numunelerin basınç mukavemetleri referans beton numunesine ulaşmakta ve hatta geçebilmektedir. Bundan dolayı ince pomza katkısı kullanımı ile basınç mukavemetlerindeki artış ileriki günlerde etkisini daha fazla ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, pomza tozu katkılı beton numunelerin uzun süreli kür işlemine tabi tutulması gerekmektedir (Toregaliyev, 2022).

Yapılan bir araştırmada geleneksel Portland çimentosu yerine ikame edilerek kullanılan ve Elâzığ bölgesindeki öğütülen pomza katkısının basınç dayanım sonuçlarına olan etkileri araştırılmıştır (Demirel, B. & Yazıcıoğlu, S. , 2006). Deney sonuçlarına göre, pomza ikamesinin artmasıyla beraber basınç dayanımlarının düştüğünü rapor etmişlerdir. Basınç dayanımlarındaki bu düşüş, 3. ve 7. günlerde çok belli iken, 28. gün sonunda ise referans numuneye çok yakın basınç dayanımı değerleri bulmuşlardır. Bunun sebebinin ise, pomzanın aktive indeksinin düşük olduğunu ve reaksiyonların yavaş olduğunu rapor etmişlerdir. Yine benzer bir çalışmada çimento yerine %5-%20 oranlarında öğütülmüş pomza kullanımının basınç dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Elde ettikleri deney sonuçlarına göre pomza ikamesinin artmasıyla beraber beton numunelerindeki basınç mukavemetlerinde azalma olduğunu belirtmişlerdir (Ekici, B. B. & Demirel, B., 2007).

Başka bir deneyde ise çimentonun yerine %5-%20 oranında öğütülmüş pomza ile çelik lifin beraber kullanıldığı çalışmada, %5 ve %10 pomzanın ikame edilmesiyle elde edilen basınç mukavemet değerinin referans numuneye yaklaştığı ve bazı

durumlarda daha yüksek olduğunu söylemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, pomza eklenmesiyle yüksek dayanıma sahip beton üretiminin mümkün olduğu rapor edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçlarına göre ise, %5 ile %10 oranında ince pomzanın kullanılmasıyla beton numunelerde elde edilen eğilme mukavemet değerlerinin referans (pomzasız) numunelere yaklaştığı ve bazı pomzalı numunelerin ise referans numunelerden daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiğini belirtmişlerdir. Fakat daha (>10%) yüksek oranlarda pomzanın ikame edilmesiyle eğilme mukavemeti değerlerinde azalma olduğunu belirtmişlerdir (Çelikten, S., 2014).

Yapılan başka bir deneysel çalışmada agregası olarak pomza kullanımının beton numunelerdeki eğilme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında agregaların %57'si ince agregası (<4mm), %23'ü 4 mm ile 8 mm arasında, kalan %20'si de 8 ile 16 mm arasındaki pomzalardan oluşmaktadır. Bu pomzalı beton 1. seri olarak isimlendirilmektedir. 2. seri olarak ise agregaların %49'u 0 ile 3mm arasında kireçtaşı kırma kumu, %28'i ince pomza agregası (<4mm), geri kalan %23'ü ise 4 mm ile 8 mm arasında pomzadan oluşmuştur. Diğer parametreler sabit tutularak bu serilerin eğilme dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarına göre, 1. seriden oluşan betonların eğilme mukavemetleri, 2. Serideki betonların eğilme mukavemetlerinden daha düşük bulunmuştur. Buna ek olarak her 2 serinin eğilme dayanımı pomzasız serinin eğilme dayanımından daha az bulunmuştur. Sonuç olarak, normal agregası yerine kullanılan pomza agregası ikamesi arttıkça betonların eğilme dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir (Türkel, S. & Kadiroğlu, B., 2007).

Başka bir deneysel çalışmada ise geleneksel Portland çimentosu yerine silis dumanı ve uçucu kül, normal agregası yerine ise pomza agregası kullanılarak KYB üretilmiştir. Üretilen bu KYB'lerin pomzasız yani referans KYB'lerden daha az basınç mukavemetine sahip olduğu belirtilmiştir (Kadiroğlu, 2005).

Yapılan bir araştırma çalışmasında agregası yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası ikamesi ile hafif beton üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre pomza ikamesinin artmasıyla basınç mukavemet değerlerinde azalma meydana gelmiştir (Dinçer, R. & Çağatay, İ. H., 2004). Başka bir çalışma kapsamında çimentoyu %15 oranlarına kadar öğütülen pomza ile ikame edilebileceği rapor edilmiştir. Çünkü bu oranlar ile elde edilen pomzalı numunelerin basınç mukavemeti ile referans beton mukavemet arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Buna ek

olarak, pomza oranının daha fazla kullanılmasıyla beton basınç mukavemetlerinde azalma meydana gelmiştir (Hossain K.M.A., 2004).

1.7.2. Uçucu Küller

Elektrik üretilirken yakıt olarak kömürün yakılması sonucunda kömür tip ve sınıfına göre değişkenlik göstermekte olan yaklaşık 16 milyon ton atık kül ortaya çıkmaktadır. Atık malzemelerin üretilmesinde termik santrallerden açığa çıkan bu ürüne uçucu kül adı verilmektedir. Atık olarak ortaya çıkan uçucu külün nihai özelliklerini belirlemek zordur, çünkü bu özellikler birtakım faktörlerden oldukça etkilenmektedir. Özellikle ülkemizde hiçbir endüstride kullanılmayıp atılmakta olan uçucu küllerin miktarı oldukça yüksektir. Normalde termik santralde üretildikten sonra atık malzeme olarak elde edilen küllerin ülkemizdeki boş arazilere atılması sonucu bu ürünler çevreyi kirletmekte ve de hava kirliliğine sebebiyet vermektedirler. Açığa çıkan bu atıkların yeniden betonların içerisinde kullanımını mümkün hale getirebilirsek ülkemizde geri dönüşüm yoluyla hem hava kirliliği hem de Portland çimentosuna olan ihtiyaç azalmış olur. Bunlara ek olarak önümüzdeki senelerde özellikle büyük şehirlerde yaşanabilecek agrega kıtlığını da uçucu kül kullanarak yapay agregaya yoluyla azaltmak bizim elimizdedir. Uçucu küllerin genel özellikleri yakılan kömür cinsine, ince olmasına, sıcaklığına, soğuma şartına ve filtreden ayrışmasına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Uçucu küldeki incelik, yakılan kömürlerin öğütülme derecesinden etkilenmektedir. Uçucu külün inceliğini etkileyen diğer bir faktörse, uçucu küllerin bacalardan kaçışının engellenmesi yoluyla elde edilir. Çünkü bacadan kaçan küller ince küllerdir. Uçucu kül dane boyutu genellikle 0.5 mikron ile 200 mikron değerlerinde değişmektedir ve şekil olarak ise küre şeklinde malzemelerdir. Özgül yüzey alanları 1800 g/cm^2 ile 5000 g/cm^2 değerleri arasında olup, ortalaması ise 2800 g/cm^2 ile 3800 g/cm^2 değerlerindedir. (Altındal, 2020).

Genel olarak uçucu küller doğadan elde edilmediği için yapay puzolan kategorisinde değerlendirilmektedir. Puzolan malzemeler doğal puolanlar ve de yapay puzolanlar olmak üzere 2 ana kategoriye ayrılırlar. Şu an çimento sektöründe uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu en çok kullanılan yapay puzolanları oluşturmaktadır. İnce olarak öğütülen puzolan malzemeler, bünyesindeki SiO_2 ve Al_2O_3 varlığı ile su ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanmaktadırlar. Genel olarak elde edilen reaksiyonlar sonucunda kalsiyum silikat hidrat ile kalsiyum

hidroksit oluşmaktadır. Bu ürünler hem boşlukları azaltmakta hem de mukavemet değerlerini arttırmaktadır. (Bilim, 2006) (Özturan, 1991).

Uçucu külün karakteristikleri yakıldığı kömürden ve yakılma metoduna göre değişmektedir. Uçucu külün alümin ve silis içermesi sebebiyle puzolanik özelliğe sahip olduğundan geleneksel çimento yerine ve/veya beton numunelerde katkı malzemesi yerine kullanılmaktadır. Uçucu külün küre şeklinde olması sebebiyle betonda kullanılması sonucu işlenebilirlikte artışa sebep olur ve aynı zamanda yavaş reaksiyona girmesi sebebiyle hidrasyon ısını düşürmektedir. Çimento hidrasyon olayında açığa çıkmış kireçle tepkimeye girip bağlayıcı jellerin oluşmasına ve mukavemet artışına katkı sağlamaktadır. Uçucu kül malzemesi ince olması sebebiyle ayrıca bir öğütme işlemine tabi tutulmazlar fakat özellikle elenmesi yani daha ince hale gelmesi uçucu külün hem aktivitesi artırır hem de daha yüksek mekanik dayanım elde edilmesine olanak sağlar. Tüm bunca iyi özelliğe rağmen dünyada kullanılan uçucu kül miktarının yalnızca %15 civarında olduğu bilinmektedir (Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A., 2009).

1.7.2.1. Uçucu kül sınıfları

Uçucu kül tek başına bağlayıcılığı olmayan fakat ortamdaki nem ile beraber kimyasal tepkimeye girerek kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum hidroksit jelleri oluşumu sonrasında bağlayıcılık özelliğine sahip olurlar. Bu sebepten ötürü uçucu külün mineralojisi nihai bağlayıcılık özelliklerini etkilemektedir. Bünyesinde var olan mineralojiye göre uçucu küller sınıflandırmaya tabii tutulmaktadır. Yapılacak sınıflandırmada uçucu küldeki CaO ve SO₃ miktarı kategoriyi belirlemektedir (Tokyay, M. & Erdoğan, K. , 1998) (Erdoğan T. , 1997) (Baradan, A. , Yazıcı, H., & Aydın, S., 2012).

Genel olarak uçucu kül bünyesindeki kalsiyum oksit miktarına göre sınıflandırma yapılmaktadır. Uçucu kül bünyesindeki kalsiyum oksit oranı %10 değerinden daha düşük olursa bu uçucu küllere düşük kalsiyum içerikli ya da düşük kireç içerikli- F tipi uçucu kül denilmektedir. Ayrıca uçucu küldeki kalsiyum oksit oranı %10'dan daha fazla olursa bu uçucu küllere ise yüksek kalsiyum içerikli ya da yüksek kireç içerikli-C tipi uçucu kül denilmektedir. ASTM C618 standardında uçucu küller 2 değişik kategorilerde farklılıklar göstermektedir.

- F-tipi uçucu kül; bitüm içerikli kömürlerden elde edilmiş ve bünyesindeki bileşenlerin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ koşulunu yerine getiren uçucu kül tipidir,
- C-tipi uçucu külse genelde linyitten ve/ya yarı-bitüme sahip kömürden elde ve bünyesindeki bileşenlerin $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ koşulunu yerine getiren uçucu kül tipidir. Siliko-aluminöz küller ise ASTM yönetmeliğinde F tipi uçucu kül kategorisinde tutulmaktadır. Siliko-kalsik küller ise hem F-tipi sınıfına hem de C-tipi uçucu kül kategorisine girmektedir. (Ünal, O. & Uygunoglu, T., 2004). Tablo 1.4 ülkemizdeki mevcut termik santrallerin üretmiş olduğu uçucu kül mineralojisini gösterilmektedir (Nazaroghlu, 2019).

Tablo 1.4. Ülkemizde üretilmiş uçucu kül mineralojisi

Mineraloj %	Uçucu küller					
	Afşin elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1	18.1	1.2	4.3	8.8	6
Kuvartz	4.5	10.9	5.6	5.1	13.9	22.4
Manyetit	0.8	0.2	2.5	0.6	4.1	2.9
Hematit	4	0.1	6	2	3	7
Anhidrit	12.2	-	9.3	7.4	-	-
Serbest caO	18.6	0.7	5.5	9.8	0.9	1
Plajiyoklaz	28	-	15	20	-	25
Camsı ve amrof faz	30	70	50	50	70	35

Kaynak: Nazaroghlu, 2019.

1.7.2.2. Uçucu kül kullanım alanları

Ülkemizde şu anda Afşin/Elbistan, Sugözü, Çayırhan, Seyitömer, Çatalağzı, Kemerköy, Orhaneli, Tunçbilek, Kangal, Yeniköy, Soma ve Yatağan termik santrallerinde uçucu küllerin üretimi devam etmektedir. Yıllık uçucu kül üretim miktarı yaklaşık 15 milyon ton civarında olup, dünyada yaklaşık uçucu kül üretimi 600 milyon tonu bulmaktadır (Liban, 2022).

Sonuç olarak elde edilen bu kül miktarı hem ekonomi hem de çevre açısından bir proble teşkil etmektedir. Bu sebepten ötürü, uçucu kül kullanımının artmasına ilişkin araştırmalar devam etmektedir. Genellikle uçucu küllerin günümüzde inşaat endüstrisinde kullanıldığı alanlar aşağıda verilmiştir:

- ❖ Çimento sisteminde ikameli, hammadde ve katkıları olacak şekilde kullanımı
- ❖ Yapay agrega olacak şekilde kullanımı
- ❖ Beton üretimi mineral katkısı olacak şekilde kullanımı
- ❖ Tuğla üretimi katkısı olacak şekilde kullanımı

- ❖ Gaz beton, bims, boru ve duvar alanlarında kullanımı
- ❖ Baraj, otoyol ve nükleer santral yapımında ve ayrıca geoteknik alanlarında,
- ❖ Beton ve harçlarda geopolimer üretiminde (Aruntaş, 2006).

Genelde uçucu küller yukarıdaki alanlarda çimentoyla beraber betonların üretilmesinde kullanılmaktadır. Uçucu kül, çimento üretiminde 2 değişik tipte uygulanabilir; ilk taşlama işlemiyle, klinker ve alçıtaşıyla beraber hammadde olacak şekilde kullanılabilir ve/ya öğütülmüş çimento ile katkı malzemesi olacak şekilde kullanılabilir. TS EN 197-1 standardında göre uçucu kül katkılı çimento tipleri 4 grupta gösterilmektedir (CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/A-W ve CEM II/B-W) (Karahana, 2006) (Liban, 2022).

Uçucu külün çimentoda katkı maddesi olarak kullanımında, elde edilecek betonlarda aşağıdaki bazı özelliklerinde olumlu ve olumsuz olarak etkilediği rapor edilmiştir: (Erdoğan T. Y., 2015)

Olumlu etkiler:

- Taze beton işlenebilirliğinin artışı
- Terlemenin azaltılması
- Hidratasyon ısısının azaltılması
- Sertleşmiş betonda su geçirimsizliğinin azaltılması
- Sertleşmiş betonda sülfat direncinin artırılması
- Ekonomik üretim

Olumsuz etkiler:

- Betonun priz geciktirmesi, bu özellik, soğuk havada beton üretiminde problem teşkil etmektedir
- Beton dökümünü takiben ilk günlerde mukavemet artış hızının düşürülmesini sağlamak
- Beton daha uzun kür süresine ihtiyaç duymaktadır.

Şu anda betonda kullanılan çimentonun yaklaşık %40'ına kadar F-tipi kül kullanılmakta olup, böylece betondaki çimento miktarında azalma gerçekleşmektedir. Yapılan deneylerde, uçucu küllü üretilen betonların mekanik dayanımları artmış, durabilite etkilerine karşı direnci de arttırmıştır. Uçucu kül eklenmesi küresel şekli sayesinde betonların işlenebilirliği olumlu etkilediği için betonda kullanımı tavsiye edilmektedir (Köker, 2019).

Klinkerde gereken silisin, uçucu kül mineralojisinde bulunmasından ötürü uçucu küller klinkerlerin üretilmesinde kullanılabilir. Sonuç olarak ise çimento özelliklerini olumlu olarak etkilediğinden üretim maliyeti düşmektedir. Uçucu kül bünyesindeki alkaliler sayesinde pH seviyesi ayarlanmakta ve böylece olası alkali-silika reaksiyonun önüne geçilmesi sağlanmaktadır. İnce boyutta (4000- 7000 cm²/g) sahip küllerin öğütülmesine gerek olmadan direk çimento fırınına konulmaktadır. Uçucu küllerin silis içermesinden ötürü özellikle gaz betonların üretiminde sıklıkla kullanımı tercih edilmektedir.

1.7.3. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Granüle Dökme Fırın Cürufu (GBFS), beton içinde çimentonun yerini almak veya karışım çimento üretimi için kullanılabilir. GBFS'nin katkı malzemesi olarak ilk kullanımı 1892'de Almanya'da ve 1896'da ABD'de olmuştur. GBFS, 1950'lerin sonlarında beton içinde ek bir bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır (Virgalitte, S. J., Luther, M. D., Rose, J. H., & Mather, B., 1987).

Demir ve çeliğin dünya çapında üretilen miktarı yaklaşık 1713 milyon tondur. Türkiye'nin toplam üretimdeki yüzdelik payı %0,2 olarak oldukça düşüktür. Demir çelik üretiminde yüksek fırın cürufu atık bir malzemedir. Türkiye'de yüksek fırın cürufu kullanımı istenilen seviyelere ulaşamamıştır. Portland çimentosu ile yüksek fırın cürufunun beraber kullanılmasıyla üretilen betonlarda erken basınç dayanımları düşüktür. Bununla birlikte, beton ileriki yaşlarda daha yüksek basınç dayanımı gösterecektir. Yüksek fırın cürufu, farklı oranlarda Si, Al, ve Ca içeren minerallerden oluşan bir maddedir. Yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliği, tek başına kullanıldığında yetersizdir. Alkali aktifleştirme sürecinde yüksek fırın cürufu bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Yüksek fırın cürufu ile alkali aktifleştirme sürecinde doğrudan beton yapımında kullanılabilir ve herhangi bir çimento eklenmesine gerek yoktur. Alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufunun mikroyapısal gelişimi, aktifleştiricideki katyonların ve yüksek oranda yüksek fırın cürufunda bulunan anyonların birleşmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek fırın cürufundaki silikat anyonları ve aktifleştirici katyonlar arasında iyon transferi gerçekleşir. Bu iyon değişimi, kimyasal reaksiyonları başlatır. Silisyum jel oluşumu, kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesiyle gözlemlenmiştir. Gözlenen bu silika jeli, yüksek fırın cürufundaki kalsiyum iyonlarının daha fazla tepkime yapması yoluyla

kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeline dönüşebilir. Yalnızca yüksek fırın cürufu kullanılarak bağlayıcılık özelliği oldukça yavaş ve düşük derecede gelişir. Yüksek fırın cürufu alkali aktifleştirme süreci yaşadığında CSH yapısı oluşur. Yüksek fırın cürufu, çimento malzemesine alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, yüksek fırın cürufu, donma-çözünme ve sülfat direnci gibi dayanıklılık faktörü açısından çok sayıda fayda sağlar (Balçıkanlı, M., Özbay, E., & Türker, H.T., 2015).

1.7.3.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi

GBFS, demir üretiminin bir yan ürünüdür. Erdoğan (2003), hematit (Fe_2O_3) ve manyetit (Fe_3O_4)'in doğada demir cevherleri olduğunu belirtmektedir. Bu madenler, az miktarda silika, alümina, kükürt, fosfor ve manganez içerir. Demir cevherlerinden demir elde etmek için, demir cevherleri yüksek fırınlarda $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmalıdır. Bu süreç sayesinde oksijen ve diğer yabancı maddeler giderilmektedir. Yüksek fırınlarda yakıt olarak kok kullanılır, bu şekilde karbon (koklaşmış kömürden gelen) ve oksijen (demir oksitlerinden gelen) bir araya gelir ve karbon monoksit ile karbon dioksit gazları oluşur. Bu gazların dışında sıvı demir ve sıvı CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO ve S bileşenleri oluşturmaktadır. Demirin yoğunluğu yabancı bileşiklerden daha ağırdır, bu nedenle demir alt kısımda kalır ve sıvı bileşikler onun üstünde yer alıp ve bu üst kısım cüruf olarak adlandırılmaktadır (Çolak, 2018). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısında, kalsiyum alümina silislerin yer aldığı bazik bileşenle demir üretimi sırasında erimiş halde bulunan atık malzeme bulunmaktadır (Erdoğan, Ş. & Kurbetçi, Ş. , 2003) (Akyildirim, 2021).

Yapılan bir araştırmada, yüksek fırın cürufunun ağır yapısı nedeniyle bu süreçte dökme demirin üzerinde kaldığını ve $1400\text{-}1600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de oluştuğu rapor edilmiştir (Tokyay, M. & Erdoğan, K., 2009). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu yavaşça soğutulduğunda, kristal bir yapı oluşturur; tersine, bu soğutma süreci hızlı bir şekilde gerçekleştiğinde, amorf bir yapı oluşturmaktadır. Ayrıca, bu tür cüruf granüle edilmiş yüksek fırın cürufu olarak adlandırılır. Cüruf türünün adı soğutma süreçleriyle belirlenebilir. Bunlar; havada soğutulmuş cüruf, genişletilmiş cüruf ve granüle cüruftur. Hindistan Mineralleri Yıllığı kitabına göre, eğer sıvılaştırılmış sıcaklıkta cüruf, havayla yavaş bir şekilde soğutulmak üzere bırakılırsa, hava ile soğutulmuş cüruf olarak kategorize etmektedir. Eğer sıvı cüruf yüksek basınçlı su jetleriyle söndürülürse, soğutulmuş cüruf amorf bir yapıya sahip olur ve granüle cüruf olarak

tasnif etmektedir. Son olarak, sıvılaşmış cürufun soğutma işlemi su veya hem su hem de buhar ile yapıldığında, genişletilmiş cüruf meydana gelmektedir. Soğutma işlemi arasında uygulanan basınçlı hava nedeniyle cürufun porozitesi artar, bu sebeple genişletilmiş cüruf hafif agrega olarak kullanılabilir (Çolak, 2018).

Kok kömürü, demir cevheri ve kireçtaşı, demir üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile bu maddelerin ayrışması gerçekleşir. Cüruf bünyesinde kükürt ve silis gibi bileşenler içerir ve demir cevheri demir oksit ile alüminyum bulunmaktadır. Kireçtaşı bu aşamada bir hammadde işlevi görmektedir. Buna uygun olarak, kullanılan kok kömürü ise süreçte yakıt olarak işlev görmektedir (Altındal, 2020).

Yapılan çalışmalar incelendiğinde erime sırasında sıcaklık değeri 1600°C'lere kadar ulaşmaktadır. Eriyebilen maddelerin alttaki tabaka pik demiri ile üstteki tabaka cüruf olacak biçimde fırınların alt tabakalarında birikmiş olur. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları ile demir ocaklardan sıra ile erimiş halde çıkartılırlar. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun o andaki sıcaklıklarla boşaltılmasının ve ne şekilde soğutulduğu, cürufun niteliklerini önemli derecede belirlemektedirler (Erdoğan T. , 2004).

1.7.3.2. Yüksek fırın cürufun kimyasal bileşimi ve hidrasyon düzeneği

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi, ham madde bileşiklerinin temin edilebilirliğine bağlıdır. Cürufun başlıca bileşenleri; CaO, SiO₂ ve Al₂O₃'ü. Üstelik cüruf ve Portland çimentosunun birbirine benzer bileşenleri vardır.

Yapılan bir araştırmada, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcı özelliklerinin CaO/SiO₂ oranının artışına bağlı olduğu beyan edilmektedir (Hewlett, 2003). Fakat, bu oran limit değerini aşarsa, granülasyon karmaşık hale gelmektedir. Öte yandan, sabit CaO/SiO₂ oranı elde edildiğinde, Al₂O₃'ün artışı cüruf aktivitesini artırmaktadır. Cürufun Fe₂O₃ ve MnO gibi diğer oksit bileşimleri, cürufun mukavemet özelliklerini negatif etkiler. MgO oranı %10'u geçmediği sürece, cürufun dayanım özellikleri için olumsuz sonuçlar göstermektedir.

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun hidrasyon mekanizması Portland çimentosuna benzerlik gösterir, ancak cüruf ve suyun reaksiyon hızı Portland çimentosundan daha yavaştır. Cüruf ve Portland çimentosu birlikte beton içinde

kullanıldığında, hidratasyon mekanizması birkaç aşamada gerçekleşir. İlk aşama, çimento kaynaklı alkali hidroksitler ile cüruf arasında gerçekleşir. İkinci aşama, çimento hidratasyonundan sonra kalsiyum hidroksit oluşur ve bu bileşen ile cüruf güçlü bir şekilde reaksiyona girer. Betonda sadece cüruf kullanıldığında, cüruf ve su yavaş bir hızda reaksiyona girer, bu da betonda mukavemet kazanım hızının yavaşlamasına sebep olur. Yalnız sadece cüruf ve su reaksiyonları, dayanım kazanımında önemli bir rol oynayamaz (Lewis, Sear, L., Wainwright, P., & Ryle, R., 2003).

Yapılan bir araştırmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kendi hidratasyonunun başlangıcının kısmen suda çözülmesiyle başladığını öne sürmektedir. Bu çözülme ile birlikte, kalsiyum silikat hidratı (C-S-H), hidratlı alüminatlar ve hidratlı silika alüminatlar çökelir. C-S-H'nin çökmesinden sonra, çözeltinin kireç konsantrasyonu yükselir. Hidratasyon reaksiyonları olduktan sonra, C-S-H, C2ASH ve C4AH13-19 bileşenleri meydana gelmektedir. Fakat, cüruf ve su arasındaki reaksiyonu hızlandırmak için alkali çözeltiler kullanılabilir. Bu aktivatörler alkali (örneğin sodyum silikat, sodyum hidroksit vb.) ve sülfat aktivatörleri olabilir. Bu aktivatörlerin kullanımından sonra C4AH19, C4ASH8 ve ettrinjit nihai ürünler olarak oluşmaktadır (Tokyay, M. & Erdoğan, K., 2009).

1.7.3.3. Yüksek fırın cürufu beton özellikleri üzerindeki etkisi

Yüksek fırın cürufunun betonunun işlenebilirliğine geleneksel betona göre daha fazla işlenebilirlik kazandırdığı bilinmektedir. Cüruf ve klinker karşılaştırıldığında, cürufun daha az özgül ağırlığı ve yüzey pürüzlülüğü vardır ve bunun sayesinde cüruf bağlayıcılı betonun işlenebilirliği artar. Pozzolanların yavaş hidratasyon hızı nedeniyle, cüruf betonunun priz süresi geleneksel betondan daha uzundur. Kimyasal katkı maddeleri kullanılmazsa, sıcak hava dökümünde sorun yaratabilir. Ayrıca, cüruf betonunda, su ayrışma oranı geleneksel betondan daha yüksek değerler gösterir. Cüruf bağlayıcı olarak seçilmişse, hidratasyon ısısında bir azalma görülebilir. Bu, çimentonun ekzotermik kimyasal tepkimesi nedeniyle hidratasyon ısısından sorumlu olmasındandır. Eğer çimento cüruf ile değiştirilirse, hidratasyon ısısı azalacaktır. Cüruf betonunun dayanım kazanımı, yavaş pozzolanik reaksiyon nedeniyle daha düşük hızda gerçekleşmektedir. Erken yaşlardaki dayanımlar geleneksel betonda daha yüksek sonuçlar gösterebilir, diğer yandan 28. günden sonraki dayanım değerleri cüruf

betonunda basınç dayanımında daha yüksek sonuçlar gösterebilir. Ayrıca bu geç dayanım kazanma mekanizması, elastik modül için de aynıdır (Çolak, 2018).

1.7.4. Alkali Aktivatörler

Jeopolimerizasyon sürecinde alkali aktivasyon için birçok alkalın aktivatör çözeltisi kullanılabilir: NaOH, KOH, Ca (OH)₂, NaOH+Na₂CO₃, K₂CO₃+Ca (OH)₂, sodyum silikat ve diğer silikatlar (Singh, N. B. & Middendorf, B., 2020).

Alman kimyacı ve mühendis Kühl tarafından 1908 yılında sertleştirilmiş portland çimentosuyla karşılaştırma yapmak için alümina ve silika içeren katı malzemelerle alkali aktivasyonu kullanılmıştır. Camsı cüruf, alkali sülfat veya karbonat oksit veya hidroksit eklenip eklenmesi ile farklı kombinasyonlarla Portland çimentosuna benzer bir performans gösterebilmektedir. Purdon, 1940 yılında alkali bağlayıcı araştırmalarını bu bilimsel tezi üzerine kurmuştur. (Kaya, 2016) .

Alümina silikat içeren malzemelerin alkali aktivasyon mekanizması henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Alümina silikatlar, güçlü bir alkali tarafından çevresel sorunlara neden olmaktadır. İlk olarak Si-O-Si bağlarının kırılması ve ardından yeni fazlar ve oluşumlar oluşmaktadır. Bu reaksiyonun önemli bir özelliği, Si-O-Si bağ yapısı içinde tüm Al atomlarının nüfuz etmektedir. Bu reaksiyonlar genellikle alümina-silikat jeller oluşturmaktadır. Bunların karışım karakteri $M_n [-(Si-O)_z-Al-O] n \cdot wH_2O$ 'dur. Başlangıç malzemeleri ve bunların karışım koşulları, C-S-H ve C-A-H olarak bilinen temel maddelerden kaynaklanabilir. Bu durumda, poli yoğunlaşma reaksiyonu olarak da bilinen ikinci H₂O reaksiyonu da oluşabilmektedir. Hem ham başlangıç maddesine hem de reaksiyon koşullarına bağlı olarak jel benzeri amorf, kısmen amorf veya kristal kökenli olabilmektedir. Alkali aktivasyon esnasında, katılan madde miktarı çok önemlidir. Çoğunlukla analsim, hidro-sodalit ve diğer kristal zeolit ürünleri son derece seyreltilmiş dağılımlar oluşturmaktadır (Kaya, 2016).

1.7.4.1. Sodyum silikat

Na₂SiO₃, minerallerde en yaygın silikat türüdür. Yeryüzündeki mevcut minerallerin %30'unu ve toplam mineral hacminin %90'ını silikatlardır. Silikat mineralleri genellikle yeryüzünde bulunmaktadır. Bu nedenle, O ve Si yeryüzünde en sık bulunan iki bileşendir. Bu bileşenlerle birlikte, silisyum-oksijen bileşikleri dünyanın yüzde 95'ini oluşturmaktadır. Yeryüzünde yaklaşık 600 farklı silikat

minerali bulunmaktadır. Bunların arasında yalnızca amfiboller, feldispatlar, mikalar, piroksenler, fedispatoitler, olivinler ve zeolitler kayaçların oluşumunda büyük bir görev almaktadır. Doğal silikat mineralleri, silikat (Si) atomunun merkezi ve dört oksijen atomunun köşelerinden oluşmaktadır (Kantarıcı, 2013).

1.7.4.2. Sodyum Hidroksit

Kostik soda, sülfürik asit, sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum hidroksit (SH) ile birlikte kimya endüstrisinin temel bileşenlerinden biridir. Bu üç temel kimyasaldan bir veya daha fazlasını üretmek için gerekli olan tek bir kimyasal nadiren bulunur ve sodyum hidroksite bağlı olmayan endüstriyel ürünler neredeyse hiç yoktur. Tuzlu suyun elektrolizi yoluyla üretilen sodyum hidroksit, katı veya çözelti halindeki sıvı olarak bulunabilmektedir. Türkiye'de katı sodyum hidroksit kostümleri genellikle palet şeklinde ve küresel şekle yakın boncuk kostümleri olarak satılmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan sodyum hidroksit, çimentonun hidratasyonunu hızlandırmak için kullanılmasına rağmen, nihai dayanımda düşüşlere neden olabilmektedir. Jeopolimer üretiminde sodyum hidroksit çözelti olarak kullanılmaktadır. Katı haldeki sodyum hidroksit tanelerinin suda çözünmesi ekzotermik bir süreçtir, bu nedenle çözelti haline getirilirken yüksek ısı açığa çıktığından dolayı tedbirli davranılmalıdır (Shi, Roy, D., & Krivenko, P., 2003).

1.8. Jeopolimerlerin Kullanılması ile İlgili Literatür Çalışmaları

1.8.1. Jeopolimerlerin basınç ve eğilme dayanımlar üzerine çalışmaları

Ferrokrom cürufu esaslı geopolimer hamur ve harçların mekanik özellikleri yapılan bir araştırma kapsamında incelenmiştir. Çalışmada, silis modülü 0.50, 0.60 ve 0.70 olarak tutulmuş olup, Na_2O molaritesi sırasıyla %4, %7, %10 ve %12 idi. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri kullanıldı. Numuneler 60 ve 80 °C 20 saat boyunca kürlenmiştir ve bazı numuneler laboratuvar ortamında kürlenmiştir. Ek olarak, harçların su/bağlayıcı oranı sırasıyla 0.30, 0.35 ve 0.40 seçilmiştir. Elde edilen çalışma sonuçlarına göre, %7 Na_2O konsantrasyonu ve 0.70 silis modülü olan numunelerde 28 günlük en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,3 olan ve laboratuvar koşullarında kürlenen jeopolimer harçlar, en yüksek dayanım değerini göstermiştir. Buna ek olarak, su/bağlayıcı oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımının azaldığı rapor edilmiştir (Karakoç, M. B., ve diğerleri, 2014).

Yapılan başka bir araştırma kapsamında yangının uçucu kül içeren jeopolimer beton üzerinde nasıl bir etkisi olduğu araştırılmıştır. Çeşitli kalınlıklarda (125, 150 ve 175 mm) çelik ağ tabakası içeren jeopolimer ve Portland çimentolu beton panelleri, çalışmada iki saat boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Bu deney, jeopolimer beton panellerde yangında normal beton panellerinden daha az çatlak olduğunu gösterdi. Jeopolimer beton paneller daha yüksek eğilme dayanımı gösterirken, normal beton paneller daha düşük eğilme dayanımı göstermiştir. Bu sonuçlar, normal beton emsallerine göre güçlendirilmiş jeopolimer beton parçalarının daha yüksek yangın dayanımı gösterdiğini göstermektedir (Sarker, Prabir Kumar & Mcbeath, Simon, 2015).

Başka bir çalışmada ise mineralojik ve mikroyapısal özellikler ile jeopolimer esaslı uçucu kül harçlarının mekanik özellikleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmada, su camı çözeltileri, NaOH ve Na₂CO₃ ile aktive edilmiş harçlar kullanılmıştır. Araştırmanın sonuçları, her durumda düşük sıralı kristal yapıya sahip bir alkalın alüminosilikat jel olan ana reaksiyon ürünü olduğunu göstermektedir. Aktifleştirilmiş uçucu külün harika performansları bu jele bağlıdır. Bunun yanı sıra, Si/Al ve Na/Al oranları alüminosilikat jelin mikroyapısını ve aktivatörü etkilemektedir. Bazı zeolitler ikincil reaksiyon ürünü olarak meydana gelir, ancak bu zeolitlerin türü ve yapısı kullanılan aktivatörün tipine bağlılık göstermektedir (Fernandez-Jimenez, Ana & Palomo, A., 2005).

Yapılan bir deney çalışması kapsamında, sodyum hidroksit ve sodyum silikatla üretilen bir jeopolimer numunelerde 65°C'de 2 gün boyunca kürlendiği jeopolimer harçlarda 39,6 MPa değerine kadar basınç dayanımlarına ulaşılar. Oda sıcaklığında bırakılan jeopolimer numuneler ise iki günde dayanım sağlayamadı. Ağırlık olarak %4 Na₂O içeren ve SiO₂/Na₂O oranı 0,75 olan karışım, 7 MPa basınç dayanımı sağladı. Yine de SiO₂/Na₂O oranı 1,25'e yükseldiğinde elde edilen basınç dayanımı 16 MPa kadar ulaştı. %5 Na₂O içeren karışımlarda SiO₂/Na₂O oranı 0,75 iken, jeopolimer numunelerin basınç dayanımları 22,1 MPa ve 29,6 MPa olarak elde edilmiştir (Tokyay, M. & Ayturan, P., 2010).

Uçucu kül içeren alkali aktive edilmiş betonların reaksiyonu, bazı araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Uçucu kül kaynağının fiziksel ve kimyasal özellikleri, karışımın yüksek fırın cürufu içermesi, kimyasal aktivatör miktarı ve kür sıcaklığı bu faktörlerden bir kısmıdır. Alkali aktive edilmiş uçucu küllü harçların dayanması için

uygun sıcaklık ve yüksek alkali oranı zorunludur. Yapılan bu araştırmada NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı kullanılarak 28 günde 70 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Mikroyapı incelemesinde, C-A-S-H jelleri oluşumu gözlemlenmiştir (Soutsos, M., Boyle, Alan P, Vinai, Raffaele, Hadjierakleous, Anastasis, & Barnett, Stephanie J, 2016).

F Tipi Sugözü uçucu külü kullanarak yapılan jeopolimer harcın mekanik özellikleri üzerine ısıt kür süresinin etkisi (Bilim, C., Karahan, O., Atış, C.D., & İlkentapar, S., 2013) tarafından incelenmiştir. Araştırmada karışımlar dört saatten yedi güne kadar 75°C'de kürlenmiş ve ardından laboratuvar ortamında 28 gün durdurulmuştur. Bulgular, daha uzun bir ısıt kür süresinin numunelerin basınç dayanımlarını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Geopolimer numunelerde 75 °C'de ısıt kür kullanılarak 75 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Uçucu kül bazlı jeopolimer betonlarla yapılan bir araştırmada, uçucu kül bazlı jeopolimer beton üretiminin tüm aşamalarını incelenmiştir. Uçucu küldeki Si ve Al içeriğini aktive etmek için NaOH ve sodyum silikat çözeltisi kullanılmıştır. Taze jeopolimer betonun özellikleri incelendiğinde, beton 120 dakika boyunca işlenebilirliğini korudu ve dayanım konusunda hiçbir azalma yaşanmadığı rapor edilmiştir. Uçucu kül kullanılarak yapılan jeopolimer betonun basınç dayanımı 40 ila 90 MPa'dır, bu da normal betonun dayanımına yakındır (Hardjito, Djwantoro & Rangan, B., Vijaya, 2005).

Yapılan diğer bir çalışmada, ince öğütülmüş pomza (P) ilavesi ile alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürufu (YFC) harçlarının dayanıklılığı ve dayanımı incelenmiştir. Araştırmada, çimento yerine %60 ve %80 oranında YFC kullanılmış ve sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) alkali çözelti olarak kullanılmıştır. Kullanılan Na_2O YFC'nin ilk adımda %6,7 ve %8'i eklendiğinden, %8 Na_2O içeren jeopolimer numunelerde daha iyi basınç dayanım değerleri gözlemlenmiştir. Bu sebeple, ikinci aşamada pomza yerine YFC'nin %5'i ve %10'u kullanılmıştır. Her iki deneysel araştırmada da silikat modülleri ($M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 0,5, 0,75 ve 1 olarak hesaplanmıştır. YFC + pomza numunelerinin dayanıklılık değerleri, referans numunelerden daha iyi olduğu belirtilmiştir (Özodabaş, A. & Yılmaz, K., 2013).

Yapılan başka bir çalışmada, Na_2SiO_3 ve NaOH alkali aktivatörleri kullanılarak ve pomza ile jeopolimer numuneler üretilmiştir. Araştırmada, üretilen numunelerin

işlenebilirliği, priz süresi ve 28 günlük basınç dayanımları üzerinde değerlendirme yapmıştır. Bulgular, pomzanın alkali aktivatörlerle aktive edilerek uygun işlenebilirlik ve 28 günlük kabul edilebilir basınç dayanımları gösteren bir jeopolimer numune oluşturma yeteneğine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Silika modülü %0,60, Na₂O konsantrasyonu %10 ve sıvı/katı (alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı) oranı 0,36 kullanılarak üretilen jeopolimer numunelerde 28. günde basınç dayanımı 47 MPa değerine kadar yükselmiştir. (Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Kani, E. N., 2008).

Hasankale bazlı pomza kullanarak yapılan başka bir araştırma kapsamında jeopolimer numunelerde alkali aktivatör/bağlayıcı oranı etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, ayrıca farklı silis modülü ($M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) ve Na₂O içeriği kullanılarak en optimum jeopolimer karışım oranlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında Na₂O içeriği %4, %7 ve %10, silika modülü 0.52, 0.6 ve 0.68, ve aktivatör/bağlayıcı oranları 0.36, 0.40 ve 0.44 olarak seçilmiştir. Yapılan araştırma sonuçlarına göre, $M_s = 0.68$, Na₂O = %10 ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.36 olan karışımın basınç dayanımlarının yaklaşık 40 MPa yükseldiğini belirtmişlerdir. Elde edilen bu sonuçlara göre, üretilen jeopolimerin yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu ve yapısal bir malzeme olarak kullanılabileceğini belirtmektedir (Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R., 2015).

1.8.2. Jeopolimerlerin asit ve sülfatlara karşı dürabilitesi

Yapılan bir araştırma kapsamında F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılarak üretilen jeopolimer numunelerin, sülfürik asit çözeltilerine maruz kaldıklarında dayanıklılığını incelenmiştir. Bu kapsamda sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum ile potasyum hidroksit karışımı alkali aktivatörlerle jeopolimer numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu jeopolimer numuneler 150 gün boyunca 5% asetik ve sülfürik asit çözeltilerine daldırılarak numunelerde meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir. Genel olarak kimyasal etki sonrasında numunelerin ağırlık, basınç dayanımı, mikro yapısal değişiklikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, asidik çözeltilere maruz kalan jeopolimer numuneler, normal Portland çimentosu Harçlarına (OPC) kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit karışımı ile aktive edilen esaslı jeopolimer numunelerde basınç dayanımı önemli ölçüde azalmıştır. Asidik ortamlarda alüminosilikat polimerlerinin depolimerizasyonu ve bazı durumlarda önemli bir

dayanım kaybına sebep olan zeolitlerin oluşumu, bu dayanım kaybının sebebi olduğu rapor edilmiştir. En iyi dayanım performansı, yüksek sıcaklıkta kürlenene ve daha kararlı bir çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapısı oluşturduğu düşünülen sodyum hidroksit ile hazırlanan geopolimer numunelerde olduğu belirtilmiştir. Asidik ortamlarda geopolimer numunelerin dayanıklılığının, kullanılan alkali aktivatör türü ve ısıtma prosedürü gibi faktörlerden etkilendiği rapor edilmiştir (Bakharev T. , 2005).

Yapılan diğer bir çalışma kapsamında üretilen geopolimer betonların (GPC) asit ve sülfatlara karşı dayanıklılığı araştırılmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında, magnezyum sülfat, sülfürik asit ve deniz suyu gibi çeşitli kimyasal ortamların geopolimer betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, özellikle sülfürik asit ve magnezyum sülfat ortamlarında geopolimer betonların Portland çimentosu betonlarına kıyasla daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Bu, geopolimer betonların agresif ortamlarda (kanalizasyon, yeraltı yapıları vb.) kullanılabileceğine dair bir işarettir. Ayrıca, geopolimer betonların mekanik özellikleri Portland çimentosu betonlarına benzer bulunmuştur, bu da geopolimer betonların yapısal tasarımlarda kullanılabileceği düşüncesini desteklemektedir (Gülşan, Alzebaree, Rasheed, Anıl Nis, & Kurtoğlu, 2019).

Yapılan başka bir çalışmada uçucu kül ve granüle edilmiş cürufu (GLSS) kullanılarak yapılan geopolimer betonların kimyasal saldırılara karşı dayanıklılığını araştırılmıştır. Çalışmada, 9 ay boyunca geopolimer beton numuneleri %3 sülfürik asit, 5% sodyum klorür, 5% sodyum sülfat, 5% magnezyum sülfat ve 5% sodyum sülfat olmak üzere dört farklı kimyasal çözeltiye daldırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, OPC ve GLSS esaslı geopolimer betonların uçucu kül ve GLSS esaslı geopolimer betonlardan daha düşük su emme ve emiciliğe sahip olduğu bulunmuştur. Bunun yanı sıra, sodyum sülfatın geopolimer betonlar üzerinde büyük bir etkisi olduğu belirtilmiştir. OPC içeren betonlar ise sülfürik asit saldırısına karşı daha hassas oldukları belirtilmiştir. Bununla birlikte, geopolimer betonun OPC içeren betonlardan farklı kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olduğu vurgulanmıştır (Albitar, M., Ali, MS. Mohamed, Visintin, P., & Drechsler, M., 2017).

1.8.3. Jeopolimerlerin yüksek sıcaklık direnci

Yapılan bir çalışmada, yüksek fırın cürufu ve ince agrega karışımının alkali aktivasyonu sonucu üretilen geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Araştırmada, kum yerine %25, %50, %75 ve %100 demir cürufu ikame edilmiş ve bağlayıcıya %4 Na₂O içeren Na₂SO₄ aktivatörü ilave edilmiştir. Bütün karışımlarda alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0,30 olarak uygulanmıştır. Numuneler 50°C'de 24 saat ısıtılma işlemine tabi tutulmuş ve 7 ile 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, numuneler 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarda 2 saat bekletildikten sonra basınç dayanım testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, demir cürufu agregasının artmasıyla basınç dayanımının arttığını ortaya koymuştur (Rashad, Alaa M. & Zeedan, Sayieda R., 2011).

Yapılan bir doktora tezinde, Nicaloic ve ark. (2014), yüksek fırın cürufunu Na₂SiO₃ (Ms=3,2) ve 14 M NaOH ile karıştırarak 48 saat boyunca 65°C'de bir ısıtılma işlemi uygulamaya tabi tutmuşlardır. Daha sonra, elde edilen geopolimer numuneler ortam sıcaklığında 14 gün boyunca kürlenmiştir. Numuneler 600°C, 800°C ve 1000°C'de yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin mikro yapıları değişti ve sıcaklık arttıkça basınç dayanım değerlerinin düştüğü belirtilmiştir (Kaya, 2016).

Yapılan bir araştırmaya göre, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kalsine killeri gibi puzolanlar kullanılarak alkali aktivatör oranlarının geopolimerin özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Seçilen alkali aktivatör/uçucu kül oranı genellikle 0,30 ile 0,45 sınırları içindedir. Alkali/uçucu kül oranı 0,40 ve 5 M NaOH konsantrasyonları ile yapılan geopolimer numunelerde yüksek basınç dayanımı sağlanmıştır. Jeopolimer harçların basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci, uçucu kül miktarı ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranından etkilendiği belirtilmiştir (Petermann, Jeffrey C., Saeed, Athar, & Hammons, Michael, I., 2010).

Yapılan başka bir çalışma kapsamında geopolimer betonun özelliklerini etkileyen bileşenler araştırılmıştır. Sonuçlara göre, daha yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonunun geopolimer numunelerde basınç dayanımını artırdığını rapor etmişlerdir. Kütledeki sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranının artması, numunelerdeki basınç dayanımını da artırmıştır. 900°C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerde basınç dayanımı ciddi bir oranda düşmüştür.

Jeopolimer betonun birçok özelliklerinin normal Portland çimentosu betonu ile karşılaştırılabilir olduğu kanıtlanmıştır (Hardjito, Djwantoro & Rangan, B Vijaya, 2005).

Yapılan diğer bir çalışmada bazaltik pomza içeren alkali ile aktifleştirilmiş kompozitlerin kürlenmesi için çeşitli kürleme koşulları araştırılmıştır. Araştırmada %80 pomza ve %20 GPÇ veya %100 pomza kullanılarak jeopolimer numuneler üretilmiştir. Numuneler 24, 48, 72 ve 96 saat boyunca kürlenmiştir. Kür işlemlerinin ardından, basınç dayanımı, UPV, kuru yoğunluk, gözeneklilik ve toplam su emme testleri uygulandı. Bulgular, tüm kürleme koşullarında basınç dayanımını artıran GPÇ ilavesinin etkili olduğunu kanıtlamıştır. GPÇ katkılı jeopolimer numunelerde 100°C'de 72 saat kürlenmesiyle en yüksek basınç dayanımı sağlanmıştır. Isıyla kürleme sıcaklığı arttıkça numunelerin basınç dayanımı artmış ve kürleme süresi kısalmıştır. Jeopolimer numunelerde basınç dayanımı arttıkça su emilimi ve gözeneklilik değerleri azalmıştır (Toregaliyev, 2022).

Başka bir çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanılarak 100 mm x 200 mm silindirik jeopolimer numuneler üretilmiştir ve bu numuneler üzerinde yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörleri kullanılarak üretilen jeopolimer betonlar, 60 derece ve 80 derece sıcaklıklarda buhar kürüne tabi tutulmuştur. Portland çimentosu ile üretilen betonlar ve jeopolimer betonlar 1000°C'nin üzerinde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre jeopolimer betonlar, Portland çimentolu betonlara göre daha az hasar almıştır. Sıcaklık artışının mikro yapıya zarar verdiğini gösteren SEM incelemeleri rapor edilmiştir. Jeopolimer betonun yüksek sıcaklık etkisindeki hasarının ana gerekçesi, agrega ve jeopolimer matrisinin sıcaklıkla farklı genleşmesi olarak belirtilmiştir (Sarker, Prabir Kumar, Kelly, Sean, & Yao, Zhitong, 2014).

Başka bir çalışma kapsamında doğal puzolan kullanarak inorganik polimer bağlayıcı üretilmiştir ve bu numuneler üzerinde kür süresi ve sıcaklığının basınç dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kür sıcaklığı için (45-85°C ve kürleme süreleri olarak ise 5, 10, 15, 20 saat kullanılmıştır. 7 günlük ön kürlemeden sonra 30 saatlik 210°C'de otoklav kürlemesi sonrası jeopolimer numunelerde en yüksek basınç dayanımını (108.7 MPa) göstermiştir (Najafi Kani, Ebrahim & Allahverdi, Ali, 2009).

Yapılan başka bir çalışma kapsamında beş farklı doğal puzolan kullanarak jeopolimer numuneler üretilmiştir. Doğal puzolanlar, son derece alkali bir ortamda Na_2SiO_3 ile aktive edilmiştir. Jeopolimer numunelere ayrıca 20, 40, 60 ve 80°C kürleme sıcaklıkları uygulanmıştır. İran doğal puzolanı olan Taftan, ısıtma işlemi olmadan aktive edilebilirken, Shahindej doğal puzolanları ise 700, 800 ve 900°C'de ısıtılarak aktive edilmesi sağlanmıştır. Çeşitli kürleme sistemleri ve $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ kütle oranları (2.1, 2.4, 3.1) kullanılmıştır. Çalışmada işlenebilirlik, hava içeriği, priz süresi, basınç ve çekme dayanımı, kuruma büzülmesi, ultrasonik darbe hızı ve elastisite modülü araştırılmıştır. Ayrıca, jeopolimer ürünlerin sülfat direnci, geçirgenlik ve klorür iyonu penetrasyonu gibi dayanıklılık özellikleri de araştırılmış ve geleneksel beton ile karşılaştırılmıştır. En yüksek reaktivite ve en iyi performans, düşük L.O.I. ve yüksek kalsiyum içeriğine sahip Taftan puzolanı kullanılarak sağlanmıştır. KOH ve sodyum silikat çözeltisi kombinasyonunun doğal puzolanları aktive etmek için en etkili aktivatör olduğu ve daha düşük $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranları ile daha yüksek dayanımlar elde edilebileceği açıklanmıştır. Doğal puzolanlar, erken yaşlarda geleneksel betona kıyasla daha düşük dayanım ve elastisite modülü sağlamış, ancak uzun süreli kürlemeden sonra daha yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü sağlanmıştır. Buna ek olarak jeopolimer numunelerdeki basınç dayanımı, sülfat çözeltisine maruz kaldıktan sonra önemli ölçüde azalmamıştır (Bonder, 2009).

1.8.4. Molarite konsantrasyonunun jeopolimer üzerindeki etkisi

Yapılan bir çalışma kapsamında, çelik liflerle güçlendirilmiş cüruf bazlı jeopolimer kompozisyonlar üretilmiştir. Çalışmada dört temel parametre incelenmiştir: Su kürü süresi (3, 7 ve 14 gün), NaOH molaritesi (12, 14 ve 16 molar), alkali aktivasyon çözeltisinin çimento ağırlığına oranı (0,24, 0,26 ve 0,28) ve çelik lifin ağırlıkça yüzdesi (%1, %3 ve %5). En yüksek dayanım değeri, 14 gün bounca kür edilen, 14 molar NaOH konsantrasyonuna sahip, alkali aktivasyon çözeltisinin çimento ağırlığına oranının %0,24 olduğu ve çelik lifin ağırlıkça %5'inin kullanıldığı numunelerde sağlanmıştır. Kür süresi arttıkça dayanım değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Örneğin, 14 M NaOH konsantrasyonu diğer konsantrasyonlara göre daha yüksek basınç dayanımı sağladı ve numunelerin çelik lif oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı rapor edilmiştir (Khalaj, Mohammad-Javad, Khoshakhlagh, Ali, Bahri, Sirous, Khoeini, Mahdi, & Nazerfakhari, Mohsen, 2015).

Yapılan başka bir araştırmada, üretilen jeopolimer harçlarının basınç dayanımının, sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonu ile güçlü bir şekilde bağlantılı olduğu rapor edilmiştir. 8 M'den 12 M'ye NaOH konsantrasyonu yükseltildiğinde, numunelerin basınç dayanımı yükselmiştir, fakat 12 M'den 18 M'ye çıkarıldığında dayanımda azalma meydana gelmiştir. Elde edilen dayanım sonuçlarına göre, dayanım sonuçlarına kürleme sıcaklığı da önemli bir etkiye sahiptir: 60°C'ye kadar yükseltildiğinde basınç ve eğilme mukavemeti artmış, fakat 80°C ve 100°C'ye yükseltildiğinde bu mukavemetin azaldığı ortaya çıkmıştır. 60 °C'de 120 saat kürleme dayanım için en iyi sonuçları oluşturmuştur. Bazaltik pomza parçacıklarının oda sıcaklığında reaksiyona girmediğini gösteren SEM taramalı elektron mikroskobu analizleri de ortaya konmuştur (Safari, Zrar, Kurda, Rawaz, Al-Hadad, Botan, Mahmood, Faraydon, & Tapan, Mucip, 2020).

Yapılan başka bir araştırmada, 8 M NaOH ve %85 12,5 M NaOH + %15 Na₂SiO₃ alkali solüsyonları ile aktive ettikleri F tipi uçucu küllerde kür uygulayarak, basınç dayanımı 70-80 MPa olarak değişen jeopolimer betonlar elde edilmiştir. En iyi kür yönteminin 20 saat 85°C'de kür uygulayarak elde edildiği belirtilmiştir (Fernandez-Jimenez, Ana & Palomo, A, 2005).

Yapılan başka bir çalışmada, uçucu kül katkılı ve pomza esaslı jeopolimer harcın mekanik özelliklerinin ıslanma-kuruma direnci, sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) değişimi ile nasıl etkilendiği inceledi. Çalışma kapsamında SH konsantrasyonları 8, 10, 12 ve 14 molar, SS'nin SH'ye ağırlık oranı ise 0, 1, 2 ve 3 idi. Bulgular, tüm SH molarite değerleri için jeopolimer harç numunelerinin basınç dayanımının SS/SH oranının artmasıyla arttığını belirtmiştir. SS/SH oranının 2'den 3'e yükselmesiyle basınç dayanımının hafif bir düşüş elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, SH molaritesinin artmasıyla SS içeriğinden daha az tesir altına girmiştir. Basınç dayanımları, ıslanma-kuruma çevrimi etkisi altında sadece SH ile aktive edilen harç numunelerinde büyük çatlaklar veya yarıklar oluşması nedeniyle değerlendirilmemiştir. SS + SH ile aktive edilen harç numunelerinin yaş-kuru performansı, SS/SH oranı ve SH molaritesinden önemli ölçüde tesir etmemiştir. SS içeriği, mikroyapı çalışmalarında FTIR analizleri yoluyla daha iyi bir jeopolimerizasyon sağlarken, SEM görüntüleri, SS içeriği ile mikro çatlakların azaldığını belirtmektedir (Karaaslan, Cemal & Yener, Engin, 2021).

Kütahya Seyitömer termik santralinden F sınıfı uçucu kül kullanarak jeopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Araştırmada, jeopolimer harcın özellikleri, çeşitli NaOH konsantrasyonları (3 M, 6 M ve 9 M), çeşitli sıcaklıklar (65°C ve 85°C) ve çeşitli kür süreleri incelenmiştir. Kür süresi ve kür sıcaklığı, jeopolimer harçların fiziksel özelliklerini etkilemiştir. Kür sürelerinin uzaması harçların gözeneklilik değerlerini azaltırken, NaOH çözeltilerinin konsantrasyonları kürleme sürecini ve gözeneklilik değerlerini etkilemiştir. 6 M NaOH ile aktive edilen ve 85°C'de kürlenen 7 günlük jeopolimer harç numuneleri, en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Basınç dayanımındaki artış, kür sıcaklığının artmasına rağmen numunelerin fiziksel özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı rapor edilmiştir (Görhan, G. & Kürklü, G., 2014).



İKİNCİ BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Geopolimer Malzemeler ve Karışım Oranları

Yapılacak çalışma kapsamında geopolimer harç numuneleri üretilecektir. Geopolimer harçların üretiminde bazaltik pomza tozu (P), F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bazaltik pomza tozu %0, %20 ve %40 oranlarında bağlayıcı olarak düşük kalsiyum içerikli uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu yerine kullanılmıştır. Pomza içermeyen geopolimer harç serilerinde %50 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %50 F-tipi uçucu kül (%0 pomza) kullanılmıştır. 2. seri olarak ise %10 bazaltik pomza tozu bağlayıcı olarak karışıma eklenmiştir. Bu durumda karışımda %10 pomza, %45 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %45 F-tipi uçucu kül bulunmaktadır. 3. seride ise karışımda %20 bazaltik pomza tozu, %40 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %40 F-tipi uçucu kül bulunmaktadır. 4. serimizde ise karışımda %30 bazaltik pomza tozu, %35 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %35 F-tipi uçucu kül bulunmaktadır. 5. serimizde ise karışımda %40 bazaltik pomza tozu, %30 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %30 F-tipi uçucu kül bulunmaktadır. Son olarak ise 6. serimizde %50 bazaltik pomza tozu, %25 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve %25 F-tipi uçucu kül bulunmaktadır. Kullanılan bazaltik pomza, F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu Sika şirketi tarafından temin edilmiştir. Kullanılan ince agrega, 4 mm'nin altında dane boyutuna sahip doğal kumdur. Toz halindeki pomzanın parçacık boyutu 200 µm'den küçüktür; pomzanın özgül ağırlığı 2.5 (g/cm³) ve Blaine inceliği 3700 (cm²/g) olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.1'de bazaltik pomza, F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir. Alkali aktivator olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında sodyum bazlı alkali aktivatörler seçilmiştir. Bunun sebebi, potasyum bazlı alkali aktivatörlerin sodyum bazlı olanlara göre daha pahalı olduğu için, daha ekonomik bir karışım elde etmek adına sodyum bazlı alkali aktivatörler yapılan çalışma kapsamında kullanılmıştır. Yapılan deney kapsamında sodyum hidroksit molaritesinin bazaltik pomza tozlu geopolimerlerin dayanım ve durabilitesine olan etkilerini öğrenebilmek

amacıyla NaOH molaritesi 8M, 12M ve 16M olacak şekilde 3 farklı sodyum hidroksit molaritesi seçilmiştir. Sodyum silikat çözeltisi (Na_2O : %11.4, SiO_2 : %30.1, su: %57.5 kütlece) sıvı olarak temin edilmiş olup herhangi bir işleme tabi tutulmamıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) ise %97-98 saflıkta peletler halinde temin edilmiş olup, karışıma ilave edilmeden önce molarite hesaplarıyla 8M, 12M ve 16M karışımlar hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit çözeltisi sırasında ekzotermik olay olduğundan karışım esnasında yüksek sıcaklık olmuştur. Bu sıcaklıkta kullanmak geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak olası çatlak oluşumuna sebep olmasını önlemek amacıyla, bu hazırlanan çözelti karışımdan 24 saat öncesinde soğuması için bekletilmiştir. Elde edilecek geopolimer karışımların işlenebilirliğinin artması amacıyla yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi (Sika Plastiment-15) kullanılmıştır. Daha önce yapılan çalışma kapsamında ve literatür taramasına uygun olarak sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olacak şekilde seçilmiştir. Bu oranın değişmesi geopolimer numunelerde hem dayanım hem de durabiliteyi etkilediği için önem arz etmektedir. Geleneksel Portland çimentolu betonlarda durabilite söz konusu olduğu zaman beton seçiminde en önemli kriterlerden birisi su/çimento oranının seçimidir. Genelde standartların çoğunda 0.45, 0.55 ve 0.65 su/çimento oranları kullanılarak beton tasarımı yapılmakta, fakat durabilite performansı için en iyi çözümün su/çimento oranı 0.45 seçilerek yapılan beton tasarımıdır. Geopolimerlerde ise su/çimento oranı yerine alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranı kullanılmaktadır. Yapılacak çalışma kapsamında durabilite performansları inceleneceği için alkali aktivatör/bağlayıcı miktarı oranı 0.45 seçilmiştir. Karışımlarda bazaltik pomza tozu olmayan numuneler P0 (pomzasız), P0-8M (pomzasız ve hidroksit molaritesi 8M), P0-12M (pomzasız ve hidroksit molaritesi 12M) ve P0-16M (pomzasız ve hidroksit molaritesi 16M) olarak adlandırılmıştır. Bazaltik pomza tozu %10 olan karışımlar P10, bazaltik pomza tozu %20 olan karışımlar P20, bazaltik pomza tozu %30 olan karışımlar ise P30, bazaltik pomza tozu %40 olan karışımlar P40 ve son olarak bazaltik pomza tozu %50 olan karışımlar ise P50 olarak isimlendirilmiştir. Pomza oranından sonrada sodyum hidroksit molaritesi numune isminin sonuna eklenmiştir. Örneğin, P10-12M numunesi %10 bazaltik pomza içeren ve 12M sodyum hidroksit molaritesine sahip numuneleri gösterirken, P50-16M numunesi ise %50 bazaltik pomza içeren ve 16M sodyum hidroksit molaritesine sahip numuneleri göstermektedir.

Tablo 2.1. Bazaltik pomza, F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Bazaltik Pomza	Yüksek Fırın Cürufu	F-tipi Uçucu Kül
SiO ₂ (%)	58.12	37.97	56.15
Al ₂ O ₃ (%)	21	13.27	26.37
CaO (%)	11.47	37.92	1.79
Fe ₂ O ₃ (%)	7	1.16	6.44
MgO (%)	7	5.64	2.35
SO ₃ (%)	0.41	0.23	0.056
Na ₂ O (%)	5.16	0.84	1.1
K ₂ O (%)	1.86	0.56	3.8
Cl (%)	-	0.01	0.09
Yanma Kayıpları (%)	1.68	0.01	2.2
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1-2	2.95	2.05
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3700	5131	3870

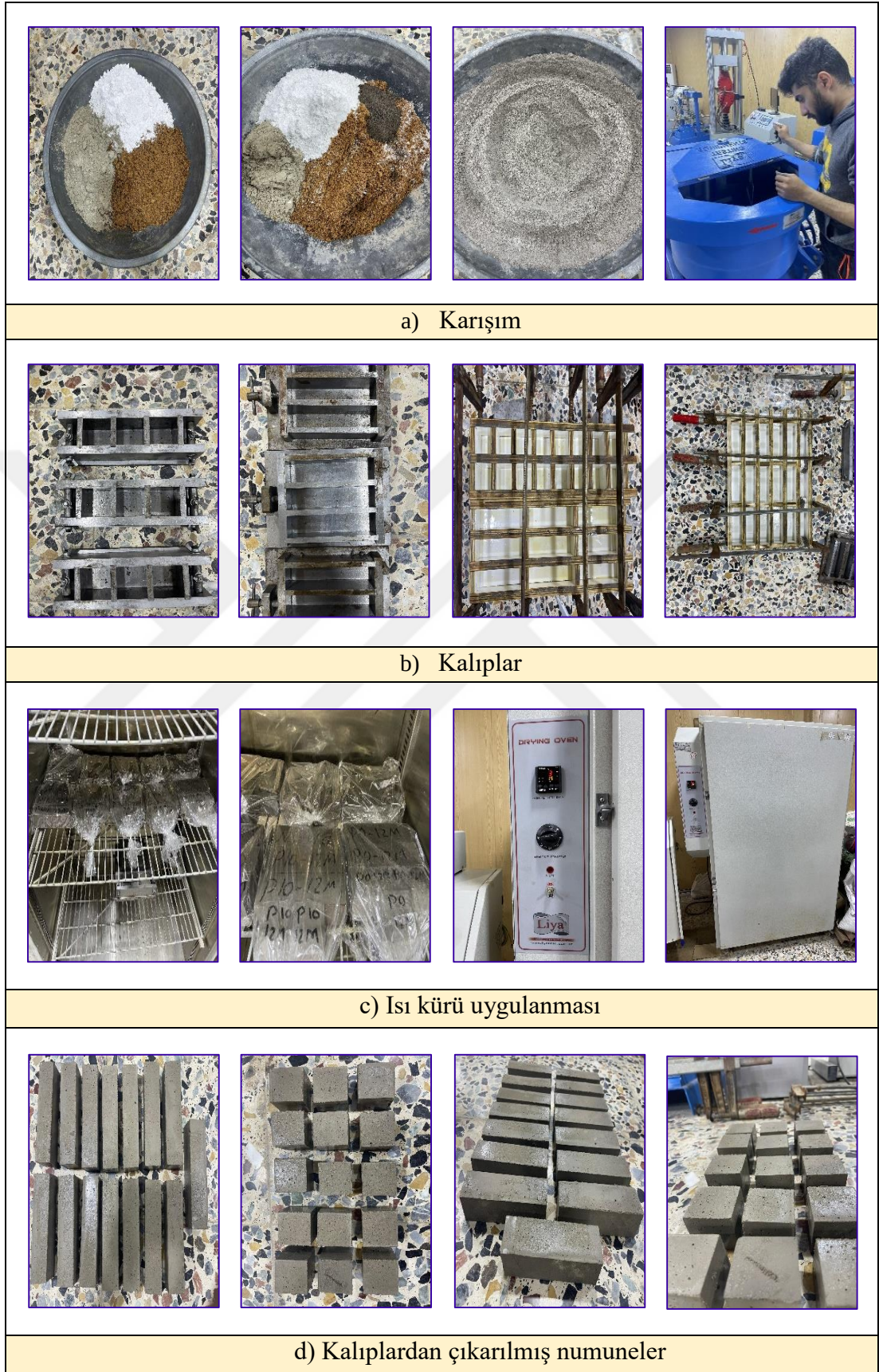
2.2. Numunelerin Hazırlanması ve Kür Koşulları

Bazaltik pozma katkılı geopolimer harç numuneleri beton üretimine benzer şekilde laboratuvar ortamında üretilmiştir. Bir gün öncesinde alkali solüsyonlar hazırlanmış (sodyum silikat ve sodyum hidroksit) ve laboratuvar ortamında 24 saat soğutulmuştur. İlk önce kuru malzemeler (kum, cüruf, kül, varsa pomza) homojenlik sağlamak için mikserde 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, önceden hazırlanan alkali aktivator çözeltisi mikserin içine eklenmiş ve 2 dakika daha homojen olacak şekilde karıştırılmıştır. Ardından, süper akışkanlaştırıcı karışıma dâhil edilmiş ve ek olarak 2 dakika daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Pomza bazlı geopolimer harçların karıştırma işlemi toplamda 6 dakika sürmüştür. Basınç dayanım testi için 50×50×50 mm küp numuneleri üretilip ASTM C39 standardına göre test edilmiştir. Eğilme dayanım testi için ise 40×40×160 mm prizmatik üretilerek EN1015-11 standardı kullanılarak eğilme dayanımları belirlenmiştir. Numuneler üretildikten hemen sonra üzeri alkali çözeltinin buharlaşmasını önlemek amacıyla plastik torbalarla kaplanmış ve geopolimerizasyon aktivasyonu için 65°C'de 48 saat süreyle ısı kürü uygulanmıştır. Isı kürü sonrası geopolimer numuneler test zamanı gelene kadar oda sıcaklığında (23±2°C) tutulmuştur. Şekiller 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4'te geopolimerin malzemeleri,

Üretilen numunelerin karışımı ve dökümü, uygulanan ısı kr, örnek numuneler, UPV testi, yüksek sıcaklık ve mekanik dayanımları, kimyasal zeltelerin hazırlanması ve testler yapılmadan önceki ağırlık ölçümü gösterilmiştir. Tablo 2.2’de ise geopolimer numunelerin üretilmesinde kullanılan malzeme miktarları verilmiştir.



şekil 2.1 geopolimerin malzemeleri



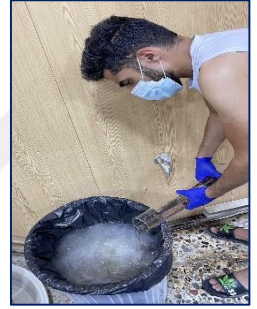
Şekil 2.2. Numunelerin karışımı ve dökümü



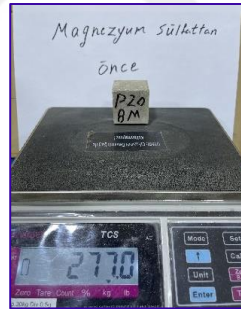
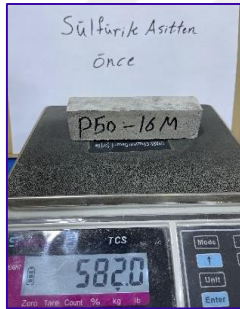
Şekil 2.3. Numunelerde UPV testi, yüksek sıcaklık uygulaması ve mekanik dayanımları



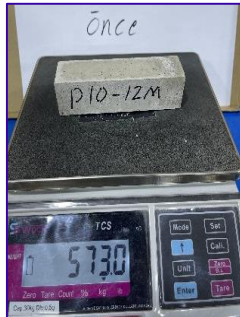
a) Sülfürik asit ve magnezum sülfat çözeltilerinin hazırlanması



b) Numunelerin Sülfürik Asit ve Magnezum Sülfat Çözeltilerinde Bırakılması



c) Numunelerin Asit ve Magnezum Sülfat Çözeltilerinde Bırakılmasından Ağırlık Ölçesi



d) Numunelerin Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmadan Önce Ağırlıkları

Şekil 2.4. Numuneler üzerinde yapılan çalışmalar

Tablo 2.2. Geopolimer harçlarda kullanılan malzeme miktarları (g/l)

Malzeme	P0	P10	P20	P30	P40	P50
Kum	1608	1608	1608	1608	1608	1608
Bazaltik pomza	0	53	107	161	214	268
Cüruf	268	241	214	187	161	134
Uçucu Kül	268	241	214	187	161	134
Sodyum silikat	172	172	172	172	172	172
Sodyum hidroksit	69	69	69	69	69	69
Süperakışkanlaştırıcı	2	2	2	2	2	2

2.3. Yapılan Deneyler

2.3.1. Yüksek Sıcaklık Deneyleri

3 farklı sodyum hidroksit molaritesi (8M, 12M, 16M) ve 6 farklı bazaltik pomza tozu ikamesi (%0, %10, %20, %30, %40 ve %50) ile üretilen geopolimer seriler üzerinde farklı dayanım ve durabilite testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece hem sodyum hidroksit molaritesi hem de pomza tozu ikamesinin geopolimer harç numunelerinin dayanım ve durabilite sonuçlarına olan etkileri etraflıca değerlendirilmiştir. Yapılan durabilite çalışmalardan ilki yüksek sıcaklık deneyleridir. Bu yüksek sıcaklık deneyi kapsamında 3 farklı sıcaklığın (200°C, 400°C, 600°C) incelenmiş olup, geopolimer harçların dayanım ve durabilite performanslarını hangi oranda etkilendiği araştırılmıştır. Bu kapsamda geopolimer harç numuneler 3 farklı sıcaklıklara ayrı ayrı maruz bırakıldıktan sonra numuneler üzerinde 7. günde, 28. günde ve 56. günde basınç ve eğilme mukavemeti testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, basınç ve eğilme testleri dışında ultrases geçiş hızı ve ağırlık değişimi testleri de yapılmıştır. Yüksek sıcaklık testleri sırasında 50x50x50 mm küp numuneleri ile 40x40x160 mm prizmatik numuneler elektrik fırına konulup fırın ısısı dakikada 5°C artacak şekilde ayarlanmıştır. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra numuneler ayrıca 2 saat boyunca hedeflenen derecelerde (200°C, 400°C, 600°C) bekletilmiştir. Burada 2 saat bekletilmesinde amaç, fırın ısısının numunelerin orta bölgelerine de homojen olacak şekilde yayılmasını sağlamaktır. 2. saatin sonunda fırın kapağı yavaşça açılarak numunelerin kontrollü bir şekilde soğuması sağlanmıştır. Yapılan yüksek sıcaklık testleri RILEM tavsiyesine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan yüksek sıcaklık testleri sonrasında mikro yapıdaki değişiklikleri incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağıtıcı x-ışını spektroskopisi (EDS) deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yüksek sıcaklık sonrası mekanik testler yapılmış ve deney sonrasında toz numuneleri alınarak plastik poşetler içerisinde ağzı kapalı olacak şekilde numuneler bekletilmiştir. Daha sonra bu numuneler Kastamonu Merkez Laboratuvarına gönderilerek SEM ve EDS analizlerinin yapılması sağlanmıştır.

2.1.1. Kimyasal Durabilite Deneyleri

Yüksek sıcaklık deneyleri dışında yine hazırlanan geopolimer harç numuneler üzerinde kimyasal durabilite testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretilen numuneler 56. gün kürlenme süresinin sonunda ayrı ayrı %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat çözeltilerine konmuştur. Geopolimer harç numuneler bu kimyasal solüsyonda 56 gün bekletilmiştir. Kimyasal durabilite testleri için herhangi bir yönetmelik ve standart bulunmamaktadır. Dolayısıyla geopolimerlerin kimyasal durabilite performanslarının ölçülmesi için kimyasal daldırma yöntemi genelde kullanılmaktadır. Bu yöntemde kimyasal solüsyon öncesi her numunenin tek tek ağırlıkları ölçülmektedir. Daha sonra bu numuneler ayrı ayrı kovalara konarak üzerlerine daha önce hazırlanan %5 sülfürik asit ile %5 magnezyum sülfatları konmaktadır. Kimyasal solüsyon konulurken numune boyutunu 5 cm geçecek kadar solüsyon konulup, olası buharlaşma durumu gerçekleşirse numunelerin kimyasal solüsyonsuz kalmamaları sağlanmaktadır. 56. günde numuneler asit ve sülfat kovalarından ayrı ayrı çıkarılarak 24 saat kuruması için bekletilmektedir. 24 saat bekleyen numunelerde ilk önce yüzey fotoğrafları çekilmektedir. Daha sonra da bu numuneler tartıya koyarak ağırlık tartımları gerçekleştirilmektedir. Böylece kimyasal solüsyon öncesi ve sonrası ağırlık değişimleri irdelenmiş olmaktadır. Daha sonra kimyasal solüsyona maruz bırakılan 50x50x50 mm küp numunelerde basınç mukavemet testleri gerçekleştirirken, 40x40x160 mm prizmatik numuneler üzerinde ise 3 noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece kimyasal solüsyonların pomza tozu ikameli geopolimer harçlarda dayanım değerlerini hangi oranda etkilediği irdelenmiştir. Kimyasal etki sonrasında yapılan mekanik testleri sonrasında da numunelerden toz örnekleri alınmış olup, plastik poşetler içerisinde ağzı kapalı olacak şekilde numuneler bekletilmiştir. Daha sonra bu numuneler Kastamonu Merkez Laboratuvarına gönderilerek SEM ve EDS analizlerinin yapılması sağlanmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

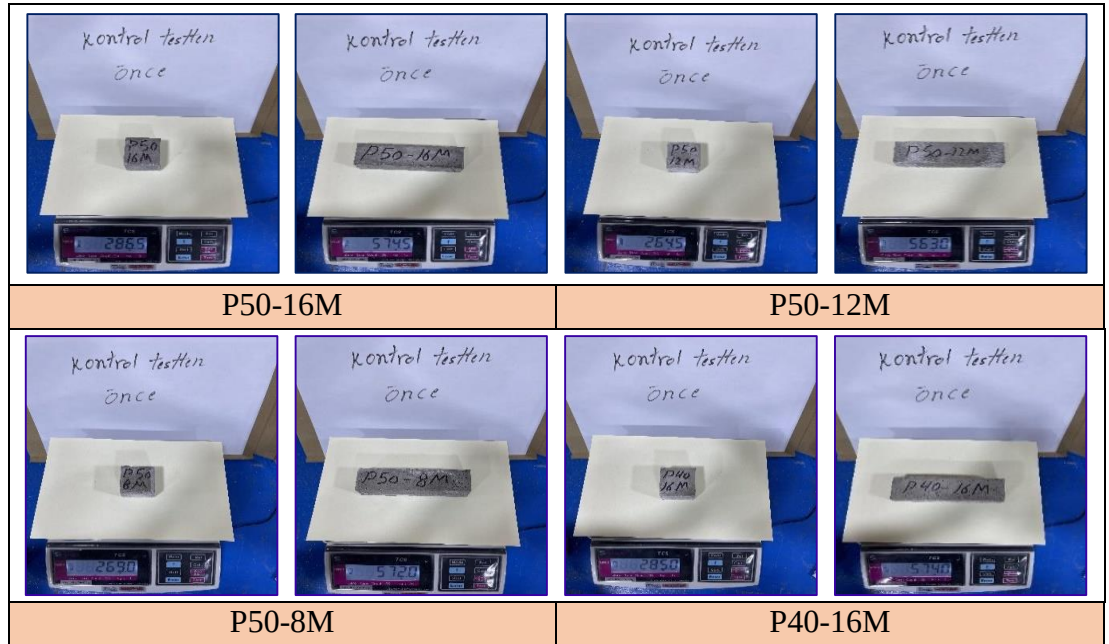
BULGULAR VE TARTIŞMA

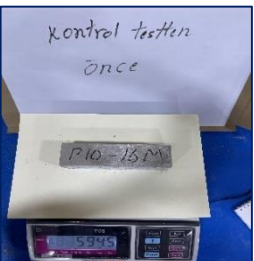
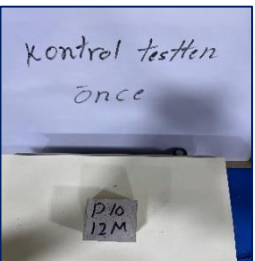
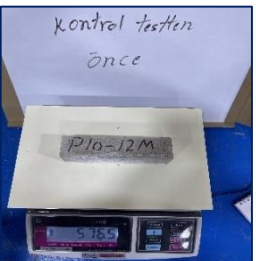
3.1. Birim Hacim Ağırlık (gr/cm³)

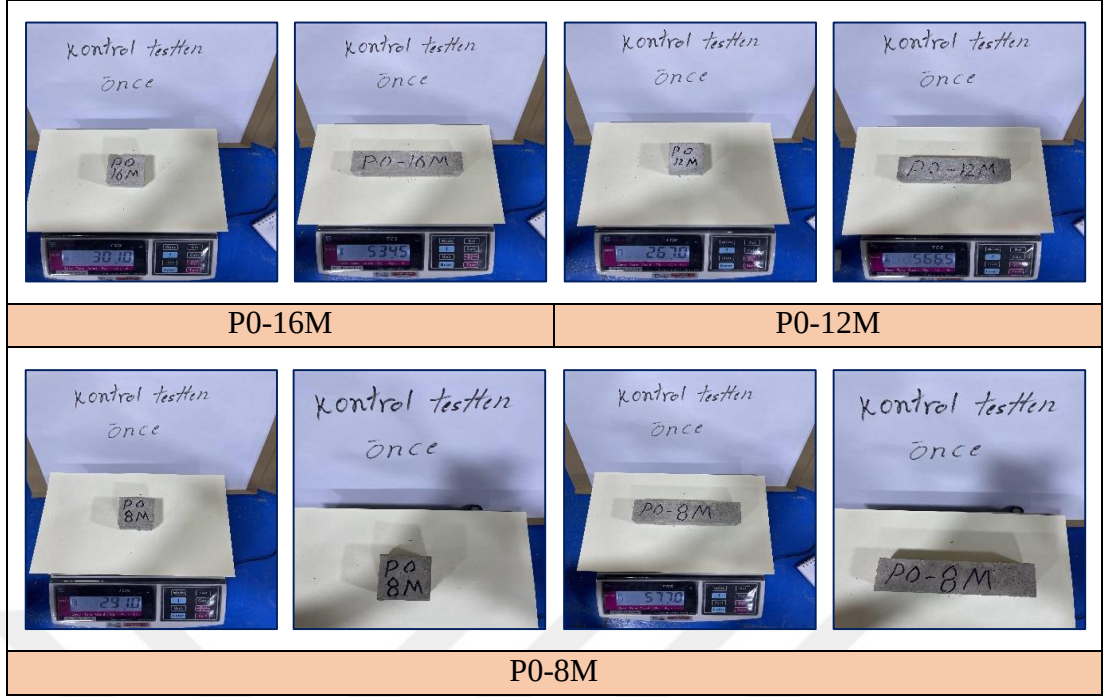
Tablo 3.1’de 50x50x50 mm ebatlarındaki küp geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, pomza oranının artması numunenin birim hacim ağırlığını azaltmaktadır. Birim hacim ağırlıklarındaki azalmanın sebebi ise pomzanın özgül ağırlığı ile mineral katkıların özgül ağırlığı arasındaki farkla ilişkilidir. Ayrıca, birim hacim ağırlıkları sodyum hidroksit molaritesi arttıkça az da olsa artmaktadır. Sodyum hidroksit molaritenin artması katı sodyum hidroksit parçacıklarının miktarının artırdığı için numunelerdeki birim hacim ağırlığı artmıştır.

Tablo 3.1. Numunelerinin birim hacim ağırlıkları (g/cm³)

Numune Adı		(g/cm³)	Numune Adı		(g/cm³)	Numune Adı		(g/cm³)
8M	P0-8M	2.36	12M	P0-12M	2.38	16M	P0-16M	2.42
	P10-8M	2.35		P10-12M	2.38		P10-16M	2.41
	P20-8M	2.34		P20-12M	2.35		P20-16M	2.38
	P30-8M	2.31		P30-12M	2.33		P30-16M	2.36
	P40-8M	2.28		P40-12M	2.30		P40-16M	2.32
	P50-8M	2.24		P50-12M	2.26		P50-16M	2.27



			
P40-12M		P40-8M	
			
P30-16M		P30-12M	
			
P30-8M		P20-16M	
			
P20-12M		P20-8M	
			
P10-16M		P10-12M	



Şekil 3.1. Geopolimer numunelerinin ağırlıkları (g)

3.2. Kontrol Numunelerinde Yapılan Test Sonuçları

3.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Tablo 3.2 ve Şekil 3.2’de geopolimer harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı sonuçları (MPa) gösterilmiştir. Pomza katkılı geopolimer harç numuneler 65°C’de 48 saat fırında kür işlemi uygulanmasına rağmen numunelerin basınç dayanımı zamanla artmıştır. Numunelerin 56 günlük basınç dayanımları en yüksek basınç dayanımı olarak bulunmuştur. Bunun sebebi olarak geopolimer numunelerin ısı kürüne rağmen devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından ötürü basınç dayanımı gelişimi zamanla devam etmektedir. Yapılan başka bir çalışmada cüruf ve uçucu kül bazlı geopolimer numunelerin uzun süreli basınç dayanımı performanslarını incelenmiştir. Geopolimer numunelere ilk olarak 80°C’de 24 saat fırında kür işlemi uygulanmış ve ardından numuneler 56 güne kadar laboratuvar ortamında bekletilmişlerdir. Uçucu kül esaslı geopolimer betonun 28 günden 56 güne kadar %48,2 oranında basınç dayanımı gelişimi gösterdiğini bildirmişlerdir. Bunun sebebi olarak ise ısı kürüne rağmen devam eden geopolimerizasyon reaksiyonları gösterilmiştir (Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S., 2017). Yapılan bu çalışmada, pomzalı ve pomzasız numunelerin basınç dayanımının, ilk fırın kürlemesinden sonra 7 günden 56 güne kadar arttığı gözlemlenmiştir.

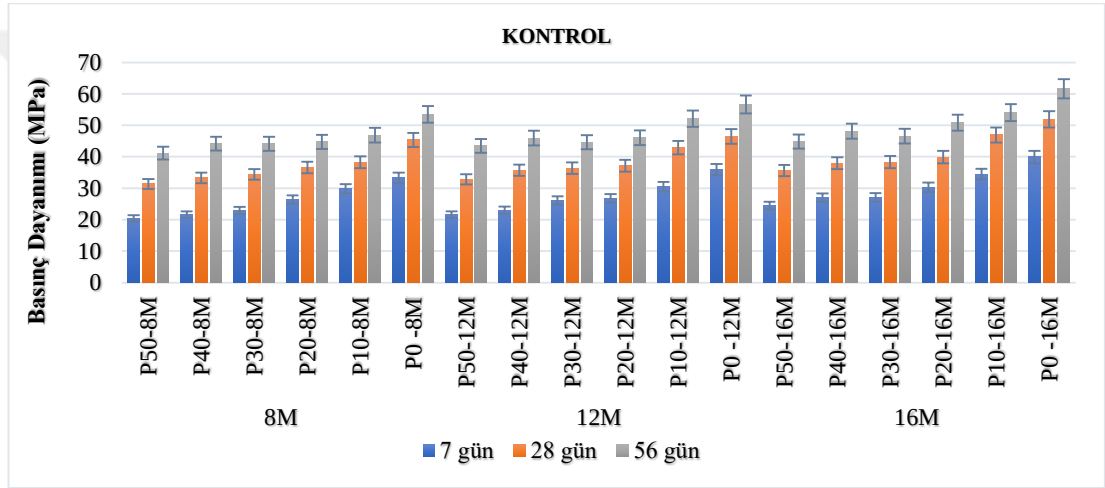
Tablo 3.2. Kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ortalama basınç dayanımları (MPa)

Kontrol numunelerinin ortalama basınç dayanımları				
Molarite	Numune ismi	7 gün	28 gün	56 gün
8M	P50-8M	20.4	31.36	41.19
	P40-8M	21.6	33.30	44.14
	P30-8M	22.9	34.40	44.11
	P20-8M	26.4	36.56	44.77
	P10-8M	29.8	38.27	46.85
	P0 -8M	33.3	45.32	53.46
12M	P50-12M	21.6	32.82	43.48
	P40-12M	23.0	35.71	45.95
	P30-12M	26.1	36.38	44.63
	P20-12M	26.8	37.14	46.06
	P10-12M	30.5	42.86	52.07
	P0 -12M	35.9	46.43	56.61
16M	P50-16M	24.5	35.65	44.85
	P40-16M	27.0	37.95	48.11
	P30-16M	27.1	38.35	46.60
	P20-16M	30.3	39.89	50.88
	P10-16M	34.5	46.92	54.01
	P0 -16M	39.9	51.90	61.62

Şekil 3.2’de elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, pomza katkısının basınç dayanımını azalttığı, bu dayanımdaki azalmanın yüksek pomza katkısı olan numunelerde daha fazla olduğu ve en düşük basınç dayanımı %50 pomza katkısı olan numunelerde elde edildiği sonuca ulaşılmıştır. Ancak zamanla bu dayanım farkı azalmıştır. Örneğin, pomza içermeyen geopolimer harç numuneler ile %50 pomza içeren geopolimer harç numuneler arasındaki ortalama basınç dayanımı farkları 7. günde %39, 28. günde %31 ve 56. günde %24 olarak bulunmuştur. Diğer pomza katkılı numunelerde de benzer basınç dayanımı farkı sonuçlarına ulaşılmıştır. %40 pomza ilavesi için basınç dayanım farkları sırasıyla 7, 28 ve 56. günlerde %34, %25 ve %19 olmuştur. Basınç dayanımı farklılıkları %30'luk pomza ikamesi için 7, 28 ve 56. günlerde sırasıyla %30, %24 ve %21, %20'lik pomza ikamesi için 7, 28 ve 56. günlerde sırasıyla %23, %21 ve %17, %10'luk pomza katılımları için ise 7, 28 ve 56. günlerde sırasıyla %13, %11 ve %10'dur. Elde edilen sonuçlara göre, pomza ikameli geopolimerlerde daha yüksek bir basınç mukavemeti için uzun bir kür süresine ihtiyaç

duyulduğunu ortaya koymuştur. Bunun nedeni olarak ise bazaltik pomza parçacıklarının cüruf ve uçucu kül tipi bağlayıcılardan alkali aktivatör etkisinde daha yavaş çözünmesine bağlanabilir.

Bu arada, pomza ikamesi oranı arttıkça basınç mukavemetindeki azalma karışımdaki öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufundaki azalmaya bağlanabilir. Bunun sebebi olarak ise cürufllu geopolimerlerde hem N-A-S-H jeli hem de C-S-H jeli oluşmaktadır. Karışımdaki cüruf azaldığında CaO miktarı da azalacağı için geopolimerizasyon sonucu oluşacak C-S-H jelindeki azalma basınç dayanımdaki düşüşü açıklamaktadır. Çünkü bazaltik pomza tozu bünyesindeki CaO miktarı yüksek değildir.



Şekil 3.2. Kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ortalama basınç dayanımları (MPa)

Aynı zamanda yapılan bu deney çalışması kapsamında sodyum hidroksit molaritesinin geopolimer harç numunelerin basınç dayanımına olan etkisi de araştırılmıştır. Sodyum hidroksit molaritesindeki artışın, pomza ikamesindeki artıştan bağımsız olarak geopolimer numunelerin basınç dayanımlarını artırdığı bulunmuştur. 16M sodyum hidroksit molaritesine sahip numuneler en yüksek basınç dayanımı sonuçları gösterirken, 8M sodyum hidroksit molaritesine sahip numuneler en düşük basınç dayanımı performansını göstermiştir. Sodyum hidroksit molaritesindeki artıştan kaynaklanan bu basınç dayanımı artışı, sodyum hidroksit çözeltisinden gelen ek sodyuma atfedilebilir ve bunun sonucunda C-(N)-A-S-H jelleri oluşur ve yoğun bir mikro yapıya ve daha yüksek mekanik dayanıma yol açmaktadır. Yapılan bir çalışmada sodyum hidroksit molaritesinin alkali aktive edilmiş harçların mekanik dayanımı üzerindeki etkisini incelemiş ve 16M sodyum hidroksitin basınç dayanımı

performansının 8M sodyum hidroksit ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, yüksek molarite sebebiyle elde edilen basınç dayanımdaki artışın C–N–A–S–H tipi jellerin oluşumunu arttırmasına atfedilebileceğini eklemişlerdir. Böylece, daha yüksek mekanik mukavemete sahip daha kompakt bir mikro yapı elde edilmiştir (Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Niş, A., 2023).

Geopolimer harç numunelerdeki basınç dayanımı sonuçları detaylıca değerlendirildiğinde (Tablo 3.2), en yüksek basınç dayanımları sırasıyla 7., 28. ve 56. günlerde 39,9, 51,90 ve 61,62 MPa pomzasız ve 16M sodyum hidroksit molariteli numunelerde elde edilmiştir. En düşük basınç dayanım değerleri ise sırasıyla 20,4, 31,36 ve 41,19 MPa %50 pomza içeren ve 8M sodyum hidroksit molaritesine sahip numunelerde elde edilmiştir. Yapısal standartların/yönetmeliklerin çoğu, yapıların inşasında bir betonun kullanılabilmesi için minimum basınç dayanımının C25/30 olmasını bildirmiştir. Bu sebeple, elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, %50 pomza katkılı geopolimer numunelerin yapıların kolon, kiriş, döşeme ve temellerinde kullanılabileceğini göstermektedir.

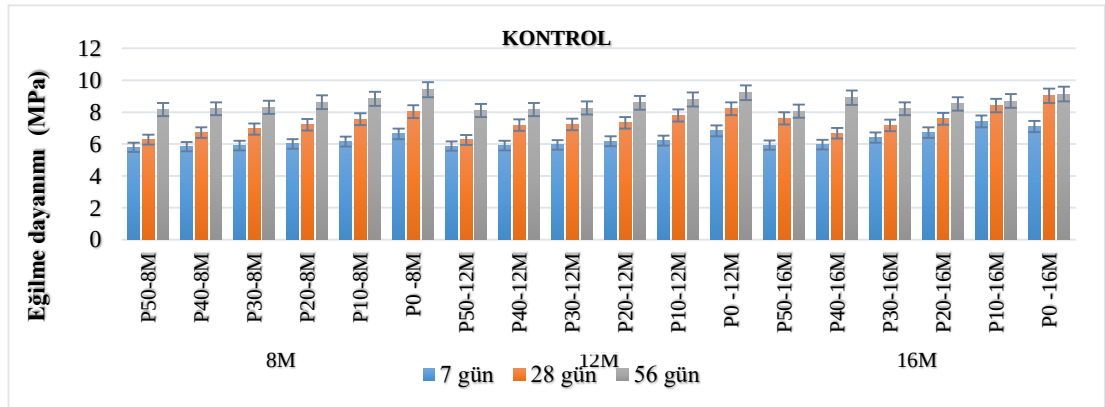
3.2.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Tablo 3.3 ve Şekil 3.3'te pomza katkılı geopolimer numunelerin ortalama eğilme mukavemeti sonuçlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, geopolimer harçların eğilme mukavemetlerinin zamanla artmaktadır. Bu da ilk fırında ısı kürü uygulanmasına rağmen eğilme dayanım değerlerindeki artışın devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından ötürü artması olarak gösterilebilir (Bakharev T., 2005) (Niş, A. & Altındal, İ., 2021) (Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S., 2017). Ayrıca, sodyum hidroksit molaritesi geopolimer harç numunelerinin eğilme mukavemetlerini de etkilemiştir. Sonuçlar incelendiğinde, sodyum hidroksit molaritesindeki 8M'den 16M'ye bir artışın eğilme mukavemeti değerlerini arttırdığını göstermektedir. Ancak 28. gün sonra, NaOH molaritesinin artmasına bağlı olarak oluşan eğilme mukavemet artışının daha az olduğu görülmüş ve geopolimer harç numunelerde 56. günde hemen hemen benzer eğilme mukavemetleri elde edilmiştir. Eğilme dayanımı değerleri 7. günde 5.80 MPa ile 7.42 MPa arasında, 28. günde 6.26 MPa ile 9.02 MPa arasında, 56. günde ise 8.06 MPa ile 9.40 MPa değerleri arasında değişmektedir. Yine benzer şekilde pomza ikamesi

arttıkça eğilme dayanımının düştüğü gözlemlenirken, en düşük eğilme dayanımı değerleri %50 pomza içeren geopolimer harç numunelerde bulunmuştur. Pomza oranı arttıkça azalan kalsiyum oksit değeri basınç dayanımdaki azalmaya paralel olarak eğilme dayanımını da düşürmüştür. En yüksek eğilme dayanım değerleri ise pomzasız numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 3.3. Kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ortalama eğilme dayanımları (MPa)

Kontrol numunelerinin ortalama eğilme dayanımları (MPa)				
Molarite	Numune ismi	7 gün	28 gün	56 gün
8M	P50-8M	5.80	6.28	8.16
	P40-8M	5.84	6.71	8.21
	P30-8M	5.90	6.94	8.30
	P20-8M	6.01	7.20	8.63
	P10-8M	6.15	7.56	8.84
	P0 -8M	6.64	8.03	9.40
12M	P50-12M	5.87	6.26	8.10
	P40-12M	5.90	7.19	8.16
	P30-12M	5.94	7.23	8.26
	P20-12M	6.18	7.33	8.59
	P10-12M	6.21	7.79	8.79
	P0 -12M	6.82	8.21	9.21
16M	P50-16M	5.93	7.61	8.06
	P40-16M	5.96	6.67	8.90
	P30-16M	6.40	7.17	8.21
	P20-16M	6.71	7.58	8.51
	P10-16M	7.42	8.41	8.70
	P0 -16M	7.10	9.02	9.13



Şekil 3.3. Kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ortalama eğilme dayanımları (MPa)

3.2.3. Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

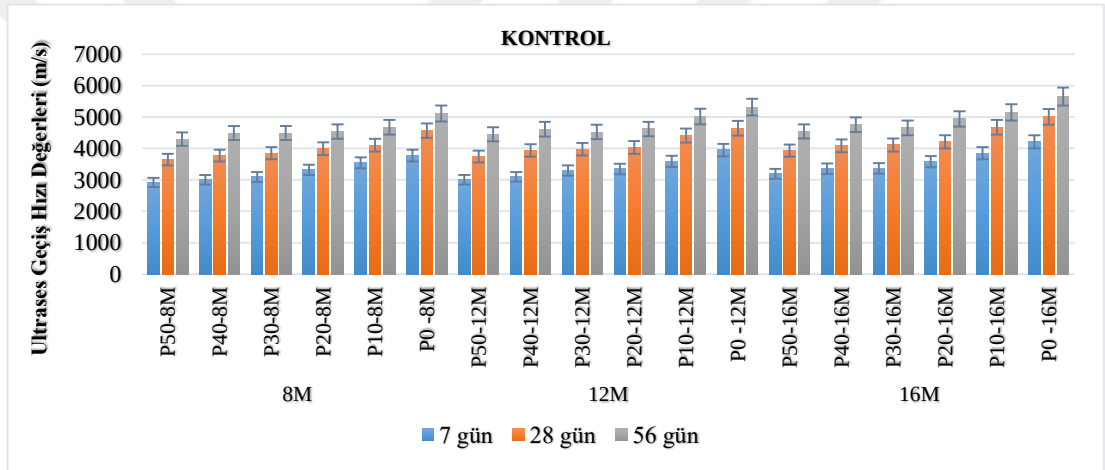
Tablo 3.4 ve Şekil 3.4’te kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ultrases geçiş hızı değerleri gösterilmiştir. Elde edilen ultrases geçiş hızı (UPV) sonuçlarına göre, UPV değerlerinin zamanla arttığı ve en yüksek UPV değerlerine 56. günde ulaşılmıştır. Bu sonuçlar devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından ötürü N-A-S-H ile C-S-H jellerinin numunelerdeki boşlukları doldurduğunu ve böylece daha boşluksuz numuneler elde edildiğini, dolayısıyla UPV değerlerinin yükseldiğini göstermektedir. Çünkü daha yoğun boşluksuz mikro yapı UPV değerlerinde gecikmeye sebep olmaktadır.

Tablo 3.4. Kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ultrases geçiş hızı değerleri (m/s)

Ultrases Geçiş Hızı Değeri Sonuçları (m/s)				
Molarite	Numune ismi	7 gün	28 gün	56 gün
8M	P50-8M	2919	3647	4298
	P40-8M	3002	3775	4493
	P30-8M	3090	3848	4491
	P20-8M	3317	3991	4535
	P10-8M	3544	4105	4672
	P0 -8M	3776	4571	5110
12M	P50-12M	3001	3744	4450
	P40-12M	3094	3935	4613
	P30-12M	3301	3980	4525
	P20-12M	3347	4030	4620
	P10-12M	3589	4408	5018
	P0 -12M	3949	4645	5319
16M	P50-16M	3194	3931	4540
	P40-16M	3357	4083	4756
	P30-16M	3367	4110	4656
	P20-16M	3574	4212	4939
	P10-16M	3852	4677	5146
	P0 -16M	4211	5007	5650

UPV değerleri daha önceki araştırmalarda sınıflandırılmıştır. UPV değerleri 2500 m/s’den azsa çok düşük hız, UPV değerleri 2500 m/s ile 3500 m/s arasında değişirse düşük hız, UPV değerleri 3500 m/s ile 4000 m/s arasında değişirse orta hız, UPV değerleri 4000 m/s ile 5000 m/s arasındaysa yüksek hız ve UPV değerleri 5000 m/s’den büyükse çok yüksek hız olarak kabul edilmiştir (Güllü, H. & Agha, A. A.,

2021) (Abed, M. H., Abbas, I. S., Hamed, M., & Canakci, H., 2022). Elde edilen UPV sonuçlarına göre, UPV değerleri 7. günde 2919 m/s ila 4211 m/s, 28. günde 3647 m/s ila 5007 m/s, ve 56. günde 4298 m/s ila 5650 m/s arasında değişmektedir. Ortalama UPV sonuçları 7. günde 3416 m/s, 28. günde 4150 m/s ve 56. günde 4768 m/s olarak bulunmuştur. Yukarıdaki sınıflandırmalara dayanarak, numuneler 7. günde düşük hız bölgesinde, hem 28 hem de 56. günde ise yüksek hız bölgesinde yer almaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada da bu çalışmaya benzer UPV değerleri elde edilmiş olup, numunelerin UPV değerleri 7. günde 4000 m/s, 28. ve 56. günlerdeyse sırasıyla 4500 m/s ve 5000 m/s civarında bulunmuştur. Geopolimer harç numunelerinde en yüksek UPV değerleri 5084 m/s ve 5224 m/s olarak bulunmuştur (Yılmaz, A., Ergün, S., Uysal, M., Aygörmez, Y., & Aygun, B. F., 2024).



Şekil 3.4. Kontrol numunelerinin farklı günlerdeki ultrases geçiş hızı değerleri (m/s)

Ayrıca, sodyum hidroksit molaritesinin 8M'den 12M ve 16 M'ye artması UPV sonuçlarını iyileştirmiştir. Bunun nedeni, daha yüksek NaOH konsantrasyonlarında ilave C-(N)-S-A-H tipi jel oluşumunun yoğun bir içyapıya yol açması ve UPV sonuçlarında gecikmeye yol açması olabilir. Önceki araştırmada sodyum hidroksit molaritesinin 8M'den 16M'ye yükselmesi nedeniyle UPV değerlerinde bir gecikme de rapor edilmiştir (Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Niş, A., 2023). Yapılan bu çalışmada da en yüksek UPV sonuçları 16M sodyum hidroksit molaritesine sahip örneklerde bulunurken, en düşük UPV sonuçları 8M olan geopolimer harç numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca pomza ikame oranı arttıkça UPV değerleri düşmüştür. En düşük UPV değerine %50 pomza katkılı numunelerde 8M NaOH konsantrasyonunda ulaşılmıştır.

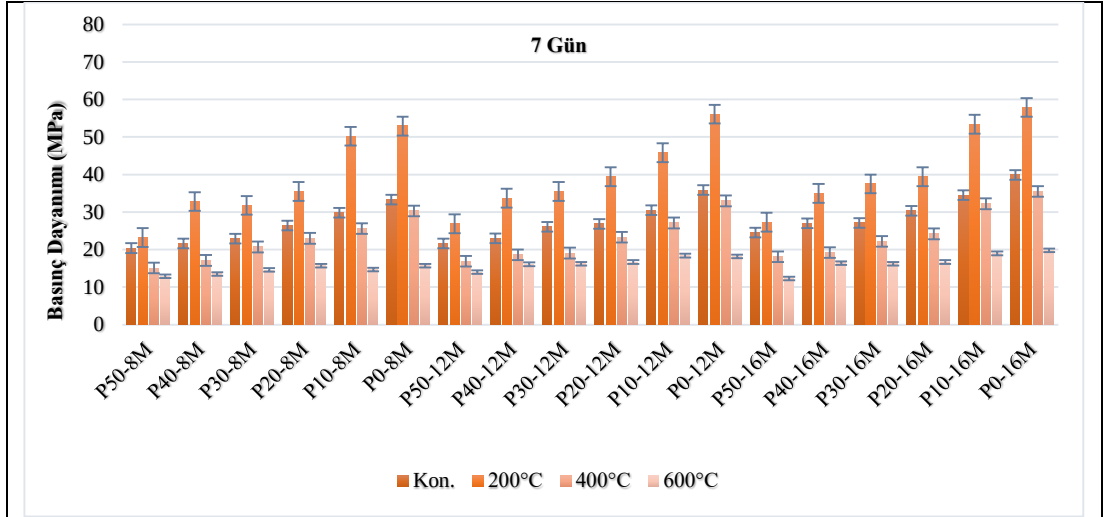
3.3. Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Numunelerinde Yapılan Test Sonuçları

3.3.1. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Sonuçları

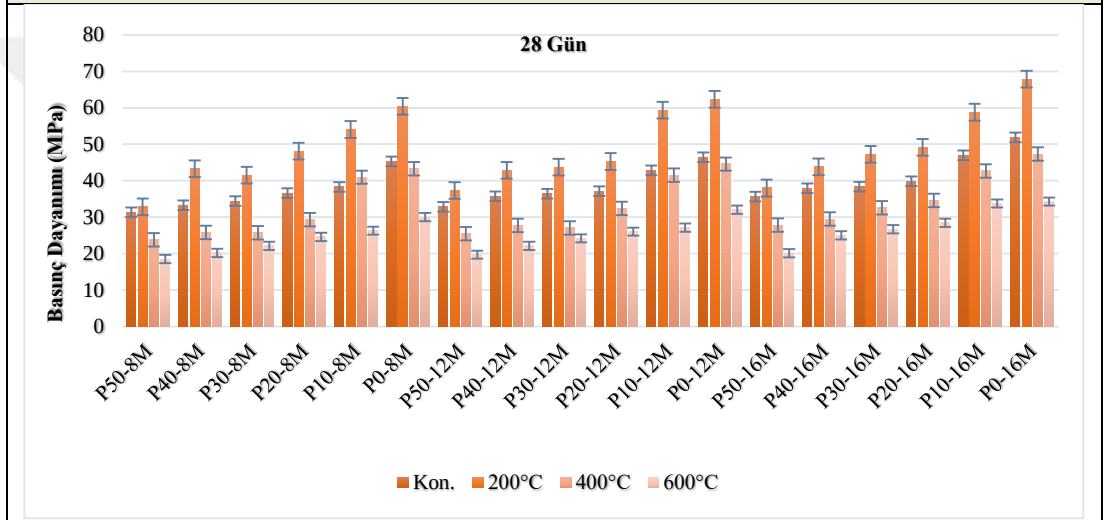
Tablo 3.5 ve Şekil 3.5'te yüksek sıcaklık etkisine (200, 400, 600°C) maruz kalan geopolimer harç numunelerin 7. Günde (Şekil 3.5.a), 28. günde (Şekil 3.5.b) ve 56. Günde (Şekil 3.5.c) ortalama basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kürleme süresi, NaOH molaritesi ve pomza ikame oranının yüksek sıcaklık sonrası artık basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Genel olarak geopolimer numunelerin basınç dayanımı 200°C'ye kadar artmış, daha sonra artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır. En düşük basınç dayanımları ise 600°C'de elde edilmiştir.

Tablo 3.5. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları (MPa)

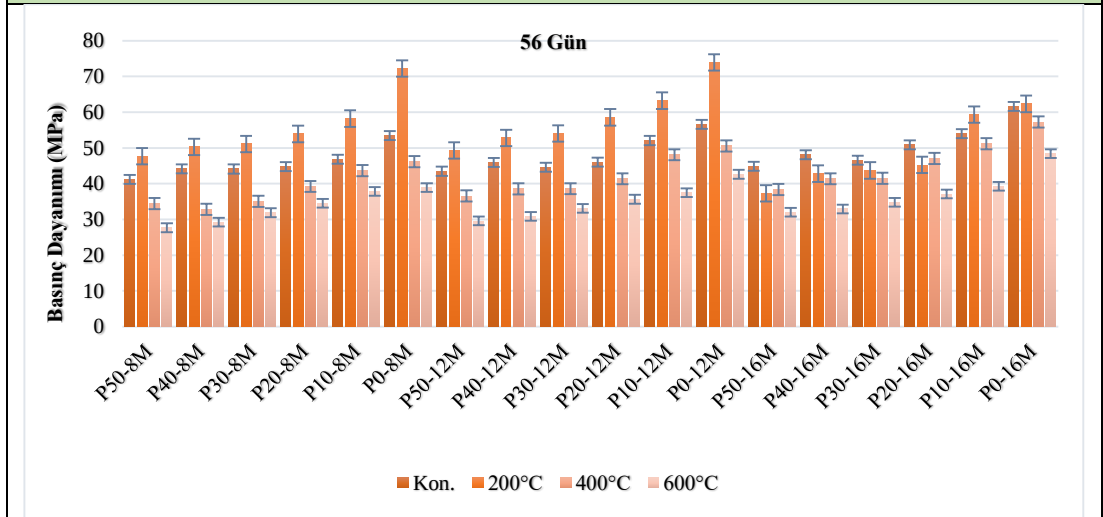
Numune	7 gün				28 gün				56 gün			
	Kon.	200°C	400°C	600°C	Con.	200°C	400°C	600°C	Con.	200°C	400°C	600°C
P50-8M	20.4	23.2	15.1	12.9	31.36	32.80	23.81	18.49	41.19	47.67	34.44	27.66
P40-8M	21.6	32.8	17.1	13.5	33.30	43.27	25.77	20.18	44.14	50.30	32.82	29.21
P30-8M	22.9	31.8	20.7	14.6	34.40	41.52	25.74	22.09	44.11	51.10	35.04	31.87
P20-8M	26.4	35.5	23.0	15.7	36.56	48.11	29.32	24.58	44.77	53.90	39.21	34.54
P10-8M	29.8	50.2	25.6	14.7	38.27	54.03	40.95	26.28	46.85	58.23	43.67	37.87
P0-8M	33.3	52.9	30.3	15.7	45.32	60.38	43.28	29.99	53.46	72.25	46.16	38.90
P50-12M	21.6	26.9	16.9	14.0	32.82	37.28	25.43	19.68	43.48	49.29	36.55	29.56
P40-12M	23.0	33.7	18.6	16.1	35.71	42.81	27.73	22.13	45.95	52.80	38.55	30.83
P30-12M	26.1	35.5	19.1	16.2	36.38	43.70	27.03	24.16	44.63	54.05	38.59	33.05
P20-12M	26.8	39.4	23.3	16.7	37.14	45.25	32.36	26.01	46.06	58.57	41.36	35.64
P10-12M	30.5	45.8	27.1	18.4	42.86	59.34	41.49	27.12	52.07	63.24	48.10	37.49
P0-12M	35.9	56.1	33.0	18.2	46.43	62.35	44.55	32.05	56.61	73.96	50.56	42.62
P50-16M	24.5	27.3	18.1	12.3	35.65	37.97	27.81	20.11	44.85	37.28	38.36	32.03
P40-16M	27.0	35.0	19.2	16.4	37.95	43.82	29.50	25.00	48.11	42.81	41.36	32.92
P30-16M	27.1	37.5	22.2	16.2	38.35	47.21	32.52	26.70	46.60	43.70	41.49	34.81
P20-16M	30.3	39.4	24.2	16.7	39.89	49.17	34.59	28.43	50.88	45.25	47.04	37.09
P10-16M	34.5	53.4	32.2	19.0	46.92	58.77	42.67	33.76	54.01	59.34	51.19	39.26
P0-16M	39.9	57.9	35.5	19.8	51.90	67.85	47.30	34.27	61.62	62.35	57.25	48.43



a) 7. günde geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçları (MPa)



b) 28. günde geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçları (MPa)



c) 56. günde geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçları (MPa)

Şekil 3.5. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış geopolimer numunelerin farklı günlerdeki basınç dayanım değerleri (MPa)

Şekil 3.5.a, 200°C'ye maruz bırakılan P50-8M geopolimer numunesinin 7 günlük basınç dayanımı, oda sıcaklığındaki eşdeğer geopolimer numunelerine kıyasla %13,73 oranında artış göstermiştir. 200°C'de, devam eden geopolimerleşme reaksiyonları nedeniyle alkali aktifleştirilmiş geopolimer numuneleinin basınç dayanımları hafifçe artmıştır. Bu bulgular, önceki çalışmalarla (Aljanabi, M., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Kadhim, S., 2022) (Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Niş, A., 2023) (Kadhim, S., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Aljanabi, M., 2022) uyumlu bulunmuştur. 200°C'deki bu dayanım artışı, içsel otoklavlama süreci ve boşlukların daha fazla C-S-H ve N-A-S-H jelleriyle dolmasıyla daha yoğun bir mikro yapı ve daha yüksek mekanik özellikler elde edilmesine bağlanabilir (El-Gamal, S. M. A., El-Hosiny, F. I., Amin, M. S., & Sayed, D. G., 2017) (Selim, F. A., Amin, M. S., Ramadan, M., & Hazem, M. M. , 2020). Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda alkali aktivatörler ile kullanılan bağlayıcılar (uçucu kül, cüruf ve pomza tozu) arasındaki hızlanan geopolimerleşme reaksiyonları da yoğun bir mikro yapıya neden olabilir (Bingöl, Ş., Bilim, C., Atiş, C. D., & Durak, U. , 2020). P0-8M geopolimer numunelerinin 200°C'deki 7 günlük, 28 günlük ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 33,3 MPa'dan 52,9 MPa'ya, 45,32 MPa'dan 60,38 MPa'ya ve 53,46 MPa'dan 72,25 MPa'ya artmıştır. Bunun yanında, yüksek sıcaklık maruziyetinden sonra geopolimer numunelerin artık basınç dayanımları üzerinde NaOH konsantrasyonunun etkisi gözlemlenmiştir. NaOH molaritesindeki bir artış, yüksek sıcaklıktan sonra geopolimer numunelerin artık basınç dayanımını artırmış ve 16M NaOH konsantrasyonuna sahip numuneler sırasıyla 12M ve 8M numunelerden daha iyi artık basınç dayanımı performansı sunmuştur. Bu durum, sodyum hidroksit çözeltisinden gelen ilave sodyumun 200°C'de daha fazla C-(N)-A-S-H jel oluşumuna yol açarak daha kompakt bir mikro yapı oluşturmaya bağlanabilir (Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Niş, A., 2023) (Kupaei, R. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z., 2014). Ayrıca, pomza katkılı geopolimer numunelerin basınç dayanımı da 200°C'ye maruz kaldıktan sonra artış göstermiştir. Bununla birlikte, pomza oranı arttıkça basınç dayanımı azalmış ve en düşük basınç dayanımı %50 pomza bulunduran numunelerde elde edilmiştir. Genel olarak, numunelerdeki su 200°C'de kaybolmaktadır. Ancak, geopolimerleşme ürünleri ayrışmamış, bu da geopolimer numunelerin dış yüzeylerinde hafif bir kızarıklığa ve dehidre hacminde büzölmeye sebep olmuştur. NaOH molaritesi ve pomza katılım varyasyonlarından

bağımsız olarak, 200°C'ye maruz kalma nedeniyle ortalama basınç dayanımı artış oranları 7 günde %40,9, 28 günde %24,10 ve 56 günde %12,22 olmuştur. Ayrıca, pomza katılımı dikkate alınmadığında, 200°C'de 7 günlük ortalama basınç dayanımı artış oranları 8M numuneler için %44,37, 12M numuneler için %43,42 ve 16M numuneler için %34,89 olmuştur. Bunun yanı sıra, 200°C'de 28 günlük ortalama basınç dayanımı artış oranları 8M numuneler için %26,87, 12M numuneler için %24,69 ve 16M numuneler için %20,72 olmuştur. 56 gün için, 8M numuneler için ortalama basınç dayanımı artış oranları %20,89 ve 12M numuneler için %21,44 iken, 16M numuneler için 200°C'de %5,69 basınç dayanımı kaybı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.5.b, 400°C'de meydana gelen sonuçlar, geopolimer numunelerin basınç dayanımında hafif bir azalma olduğunu göstermiştir. 400°C'de, kristal suyun daha fazla kaybı, daha fazla hacim büzülmesine neden olmuş ve numunelerin renkleri sarıya dönmüştür; bu da bünyedeki serbest su ve kristal su kaybına bağlanabilir. Numunelerin çoğunda, 400°C'de yüzeylerde küçük mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu sebeple, basınç dayanımı azalması, mikro çatlak gelişiminin yanı sıra geopolimerlerdeki olası faz değişimi geçişine ve farklı termal genleşmeye bağlanabilir (Kadhim, S., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Aljanabi, M., 2022). 400°C'ye maruz kalma nedeniyle ortalama basınç dayanımı kayıp oranları 7 günde %16,85, 28 günde %15,03 ve 56 günde %12,72 olmuştur. 400°C maruz kaldıktan sonra ortalama basınç dayanımı kayıp oranları 7 günde 8M için %15,40, 12M için %16,67 ve 16M numuneler için %18,49 olmuştur. 28 günde 8M için %14,86, 12M ve 16M numunelerin her ikisi için de %15,11 olmuştur. Kayıp oranları 56 günde 8M için %15,91, 12M için %12,35 ve 16M numuneler için %9,89 olmuştur. Sonuçlar, basınç dayanımı kayıplarının kürlenme süresiyle azaldığını göstermiştir. NaOH konsantrasyonlarından bağımsız olarak geopolimer numunelerde benzer basınç dayanımı kayıpları elde edilmiştir.

Şekil 3.5.c, 600°C'deki sonuçlar, geopolimer numunelerde 600°C'de daha büyük dayanım kayıp oranlarının elde edildiğini göstermiştir. Bu durum, 600°C'de serbest suyun buharlaşması, matriks dehidratasyonu ve termal reaksiyon mekanizmasından kaynaklanabilir (Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Niş, A., 2023) (Zhang, Hai Yan, Kodur, Venkatesh, Wu, Bo, Cao, Liang, & Qi, Shu Liang, 2016). Ortalama olarak, 600°C'ye maruz kalma nedeniyle basınç dayanımı kayıp oranları 7 günde %41,88, 28 günde %34,57 ve 56 günde %27,29 olmuştur. 600°C maruziyetinden sonra ortalama basınç dayanımı kayıp oranların 7 günde 8M

için %42,43, 12M için %38,30 ve 16M için %44,91 olmuştur. 28 günde ortalama basınç dayanımı kayıp oranları 8M için %35,69, 12M için %34,89 ve 16M için %33,14 olmuştur. 56 günde, 600°C'ye maruz kaldıktan sonra 8M için %27,28, 12M için %27,70 ve 16M için %26,88 olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, 600°C maruziyeti için basınç dayanımı kayıplarının kürlenme süresiyle azaldığını ve NaOH konsantrasyonundan bağımsız olarak geopolimer numunelerde benzer basınç dayanımı kayıplarının elde edildiğini bir kez daha ortaya koymuştur; bu da, yüksek sıcaklık maruziyetinden sonra artık basınç dayanımı üzerinde NaOH konsantrasyonunun hiçbir etkisinin olmadığını veya ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir ki bu, ekonomik bir geopolimer beton üretimi için 8M NaOH kullanımının faydalı olabileceğini ortaya koymuştur.

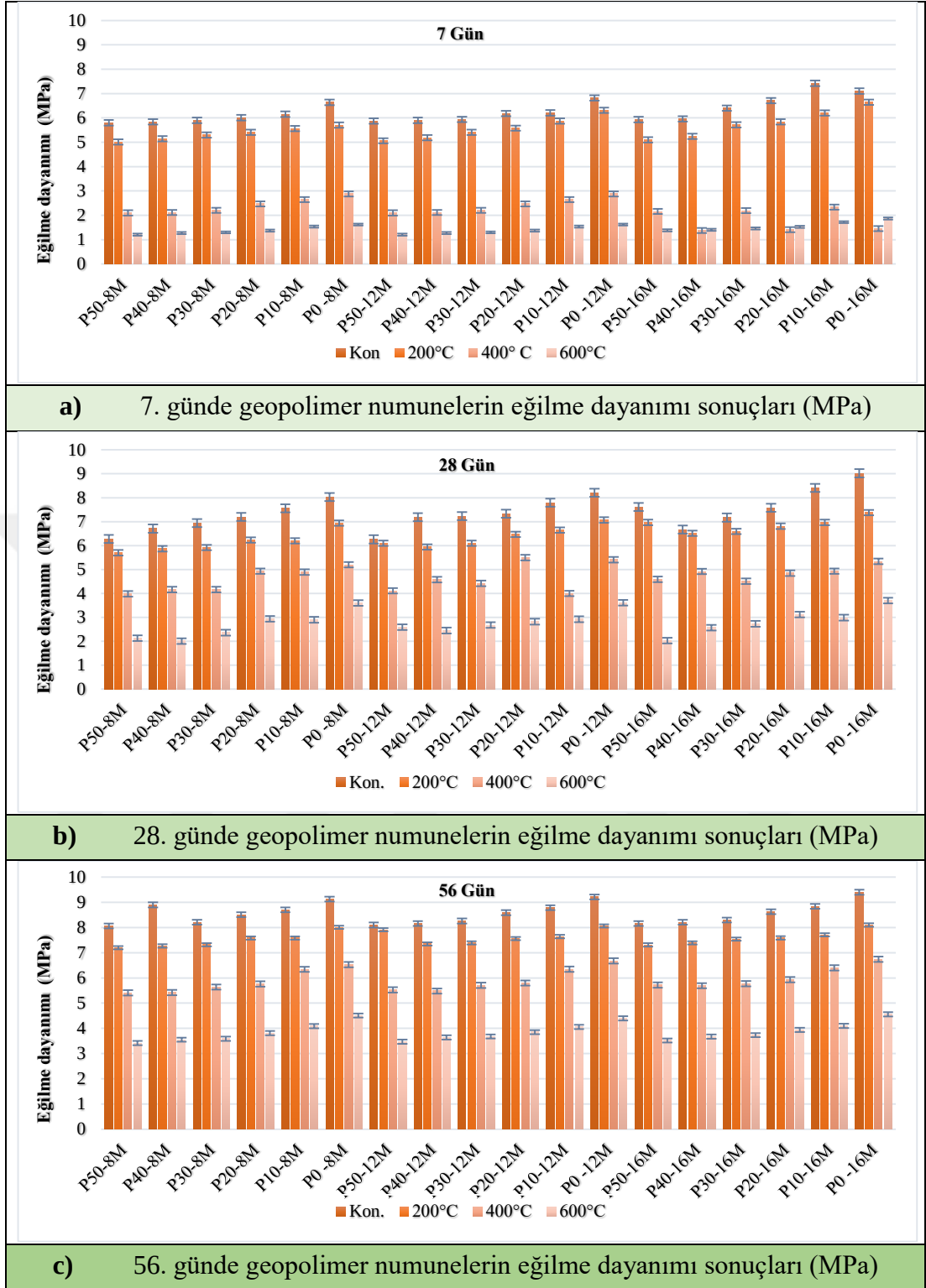
Yüksek sıcaklıklardan sonra geopolimer numunelerin basınç dayanımı üzerindeki pomza katkıları değerlendirildiğinde (Tablo 3.5), %30'a kadar pomza katkılı numunelerde basınç dayanımı kayıplarının, pomzasız numunelere kıyasla neredeyse benzer olduğu bulunmuştur. Bundan sonra, %40 ve %50 pomza katkılı numunelerde kayıplar daha yüksek hale gelmiştir. Yüksek sıcaklık direnci için, cüruf/uçucu kül bazlı geopolimer numunelerde %30 pomza tozu kullanımı faydalıdır.

3.3.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Sonuçları

Tablo 3.6 ve Şekil 3.6'da yüksek sıcaklık etkisine (200, 400, 600°C) maruz kalan geopolimer harç numunelerin 7. Günde (Şekil 3.6.a), 28. günde (Şekil 3.6.b) ve 56. günde (Şekil 3.6.c) ortalama eğilme dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kürlenme süresi, NaOH molaritesi ve pomza ikame oranının yüksek sıcaklık sonrası artık eğilme dayanımını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Genel olarak geopolimer numunelerin eğilme dayanımı zamanla arttığı ortaya çıkmıştır, bu sonuçlar devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından zamanla daha yoğun mikro yapıya atfedilebileceğini kanıtlamıştır. Bunun sonucunda numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin yükseldiğini göstermektedir. Ancak diğer yandan yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, sıcaklığın artmasıyla birlikte numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.

Tablo 3.6. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harçların eğilme dayanımı sonuçları (MPa)

Numune	7 gün				28 gün				56 gün			
	Kon	200 °C	400 °C	600 °C	Kon.	200 °C	400 °C	600 °C	Kon.	200 °C	400 °C	600 °C
P50-8M	5.80	5.01	2.10	1.21	6.28	5.70	3.98	2.13	8.06	7.20	5.41	3.42
P40-8M	5.84	5.14	2.12	1.27	6.71	5.87	4.16	2.01	8.90	7.27	5.42	3.55
P30-8M	5.90	5.30	2.21	1.30	6.94	5.92	4.16	2.36	8.21	7.32	5.64	3.59
P20-8M	6.01	5.41	2.47	1.37	7.20	6.23	4.93	2.94	8.51	7.58	5.76	3.81
P10-8M	6.15	5.56	2.65	1.54	7.56	6.20	4.89	2.90	8.70	7.58	6.34	4.09
P0 -8M	6.64	5.71	2.88	1.62	8.03	6.94	5.20	3.60	9.13	8.01	6.53	4.51
P50-12M	5.87	5.06	2.10	1.21	6.26	6.10	4.11	2.59	8.10	7.91	5.53	3.47
P40-12M	5.90	5.19	2.12	1.27	7.19	5.94	4.58	2.45	8.16	7.35	5.48	3.64
P30-12M	5.94	5.41	2.21	1.30	7.23	6.10	4.42	2.68	8.26	7.39	5.71	3.68
P20-12M	6.18	5.58	2.47	1.37	7.33	6.47	5.50	2.82	8.59	7.56	5.80	3.85
P10-12M	6.21	5.87	2.65	1.54	7.79	6.65	4.00	2.92	8.79	7.64	6.35	4.06
P0 -12M	6.82	6.31	2.88	1.62	8.21	7.07	5.41	3.61	9.21	8.06	6.68	4.40
P50-16M	5.93	5.10	2.16	1.38	7.61	6.97	4.59	2.03	8.16	7.31	5.72	3.52
P40-16M	5.96	5.24	1.38	1.41	6.67	6.51	4.92	2.57	8.21	7.39	5.69	3.67
P30-16M	6.40	5.72	2.19	1.46	7.17	6.59	4.51	2.73	8.30	7.54	5.77	3.73
P20-16M	6.71	5.84	1.41	1.53	7.58	6.81	4.85	3.12	8.63	7.59	5.93	3.94
P10-16M	7.42	6.20	2.34	1.72	8.41	6.97	4.93	2.99	8.84	7.71	6.40	4.10
P0 -16M	7.10	6.64	1.46	1.87	9.02	7.38	5.34	3.70	9.40	8.10	6.74	4.56



Şekil 3.6. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış geopolimer numunelerin farklı günlerdeki eğilme dayanım değerleri (MPa)

Şekil 3.6.a, 200°C'ye maruz bırakıldıktan sonra geopolimer numunelerin eğilme dayanım azalmalarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre numunelerin eğilme dayanımlarını 200°C'de hafifçe azaldığını göstermiştir. Bu azalma, eğilme dayanımın

mikro yapısal bozukluklara, çatlak oluşumlarına, yayılmalarına ve gözenekli mikro yapının değişimlerine daha hassas olmasından kaynaklanıyor olabilmektedir (Zhang, Hai Yan, Kodur, Venkatesh, Wu, Bo, Cao, Liang, & Qi, Shu Liang, 2016). 200°C sıcaklık etkisi altında, NaOH molaritesi ve pomza oranlarındaki farklılıklara rağmen, deney esnasında ortalama eğilme dayanımlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 7., 28. ve 56. günlerde ölçülen eğilme dayanımı değerleri, başlangıç değerine kıyasla sırasıyla %11,08, %12,32 ve %11,36 azalmıştır. NaOH molaritesi ve pomza katılım değişimlerinden bağımsız olarak, 200°C'ye maruz kalma nedeniyle ortalama eğilme dayanımı azalmaları 7. günde %11,08, 28. günde %12,32 ve 56. günde %11,36 olmuştur. Bunun yanı sıra pomza eklenmesi dikkate alınmadığında, 200°C sıcaklıkta 7. günde 8M, 12M ve 16M geopolimer numunelerin ortalama eğilme dayanımlarında sırasıyla %11,56, %9,57 ve %12,10 oranında azalma gözlemlenmiştir. 28. günde ise azalma oranları sırasıyla %13,58, %12,64 ve %10,73 olarak tespit edilmiştir. 56 günlük kürlenme sonunda ise numunelerin ortalama eğilme dayanımında sırayla %12,65, %10,06 ve %11,37 azalma ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.6.b, 400°C'ye maruz bırakıldıktan sonra geopolimer numunelerin eğilme dayanımı düşüşlerini göstermektedir. Elde edilen sonuçları incelendiğinde geopolimer numunelerin eğilme dayanımlarını 400°C'de daha belirgin bir eğilme dayanımı düşüşü görüldüğünü göstermektedir. NaOH molaritesi ve pomza oranlarındaki değişikliklere rağmen, 400°C'ye maruz kaldıkdıktan dolayı ortalama eğilme dayanımı azalmaları 7. günde %64,54, 28. günde %36,40 ve 56. günde %30,70 olarak meydana gelmiştir. Bununla birlikte pomza eklenmesi hariç tutulduğunda, 400°C sıcaklıkta 7 günde kürlenme süresi sonunda 8M, 12M ve 16M geopolimer numunelerin ortalama eğilme dayanımlarında sırasıyla %60,41, %61,04 ve %72,18 oranında azalma gözlemlenmiştir. 28 günde kürlenme süresi sonunda ise azalma oranları sırasıyla %36,13, %36,21 ve %36,87 olarak tespit edilmiştir. 56 günlük kürlenme sonunda ise numunelerin ortalama eğilme dayanımında sırayla %31,87, %30,53 ve %29,71 kaydedilmiştir.

Şekil 3.6.c, 600°C'ye maruz bırakıldıktan sonra eğilme dayanımındaki azalmasını göstermektedir. En yüksek eğilme dayanımı azalması bu numuneleinde gözlemlenmiştir. NaOH molaritesi ve pomza ilavesinden bağımsız olarak, 600°C'ye maruz kaldıkdıktan sonra ortalama eğilme dayanımı azalmaları 7 günde %77,02, 28 günde %62,48 ve 56 günde %54,93 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca pomza ilavesi

dikkate alınmadığında, 600°C'da 7 günlük kürlenme süresi sonunda 8M, 12M ve 16M geopolimer numunelerin ortalama eğilme dayanımlarında düşüşleri sırasıyla %77,19, %77,54 ve %76,32 olarak tespit edilmiştir. 28 gün sonunda bu oranlar %63,02, %61,26 ve %63,16 iken, 56 gün sonunda %55,46, %54,87 ve %54,45 olarak kaydedilmiştir.

Yüksek sıcaklık nedeniyle 7. günde kürlenme esnasında kaydedilen daha yüksek eğilme dayanımı kaybı, dayanım ve dayanıklılıktan sorumlu olan jeopolimerik C-S-H ve N-A-S-H jellerinin yetersiz oluşumuna bağlanabilir. Serbest sular yüksek sıcaklıklarda buhara dönüşür, bu da matrise daha fazla çekme gerilmesi bindirir; dolayısıyla buhar basınçları matrislerin çekme dayanımlarını aşarsa çatlama meydana gelir. Bu tip yüksek dayanım azalmaları, yüksek sıcaklıktan dolayı buhar etkilerine bağlanabilir. Serbest su, yüksek sıcaklıklarda buharlaşarak matriste daha fazla çekme yükü/gerilimi yaratır ve bu sebeple buhar basınçları matrislerin çekme dayanımlarını aşarsa çatlama meydana gelir. Termal çatlak oluşumundan sonra hem sertlik hem de yoğunluk azalır ve bu da mekanik dayanım kayıplarına yol açar. Ayrıca, yüksek sıcaklık nedeniyle daha yüksek mekanik mukavemet kaybı, serbest suyun buharlaşmasına, matrisin susuz kalmasına ve termal reaksiyonlara bağlanmıştır (Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Qi, S. L., 2016). Bu sonuçlar, 600°C'de eğilme dayanımında yaklaşık %70 oranında azalma olduğu önceki araştırmayla paralel olarak göstermektedir (Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmmez, Y., & Niş, A., 2023).

3.3.3. Yüksek Sıcaklık Sonrası Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

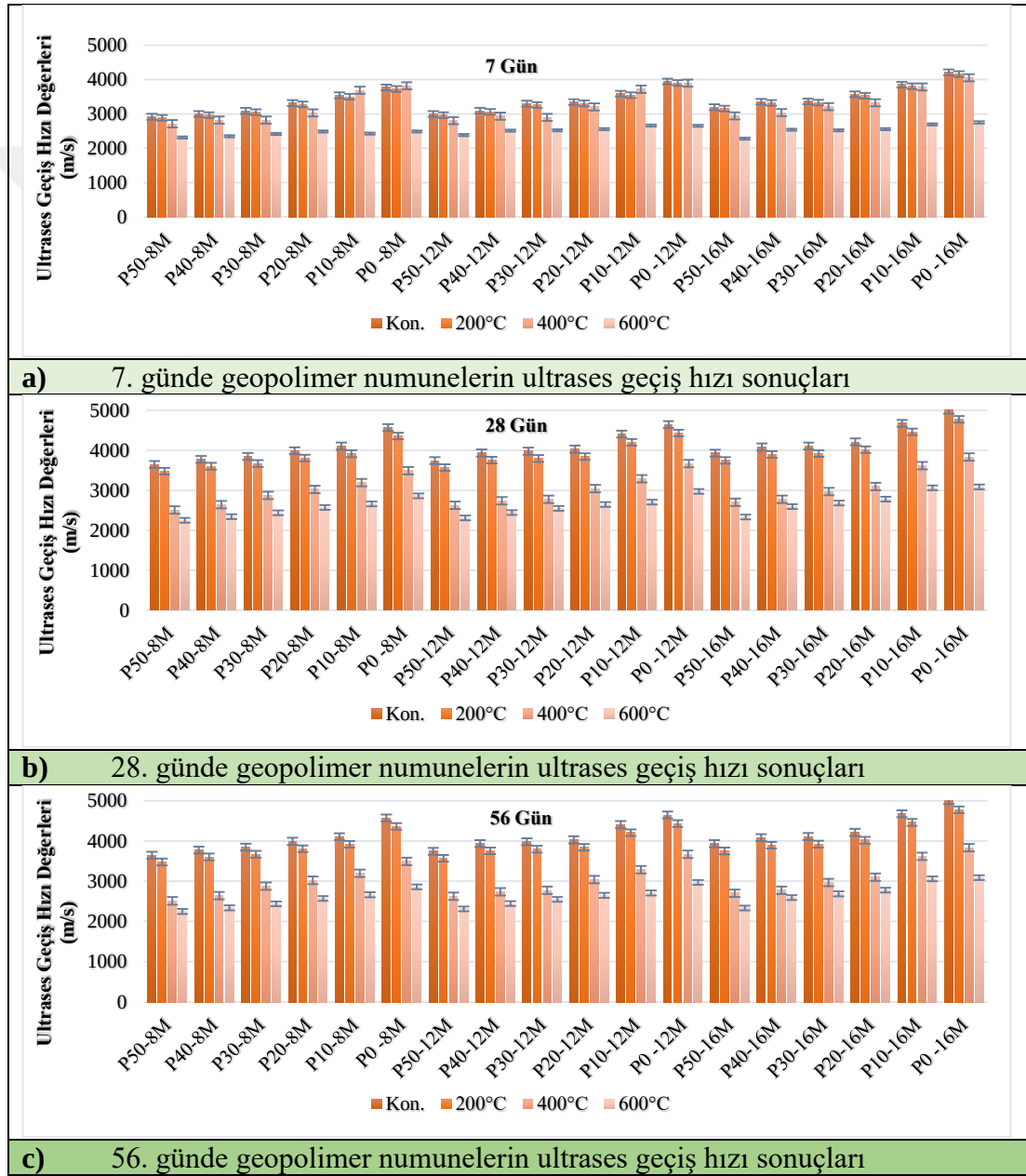
Tablo 3.7 ve Şekil 3.7'de yüksek sıcaklık etkisine (200, 400, 600°C) maruz kalan geopolimer harç numunelerin 7. günde (Şekil 3.7.a), 28. günde (Şekil 3.7.b) ve 56. günde (Şekil 3.7.c) ortalama ultrases geçiş hızı (UPV) sonuçlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre UPV değerlerinin artan sıcaklıkla azaldığını ve en düşük UPV değerlerinin 600°C'ye maruz bırakılan numunelerde gözlemlendiğini göstermiştir. Çatlaklar, bozulmalar ve boşluklar, UPV değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra suyun buharlaşması gözenek oluşumuna nedeniyle ultrases geçiş hızı değerlerinde azalmayı sağlamaktadır. Ayrıca, 200°C'de UPV değerlerinde hafif bir düşüş gözlemlenirken, 400 ve 600°C'de ciddi bir şekilde azalma meydana gelmiştir. En düşük UPV değerleri, mikro yapıda gözenek oluşumuna ve düşük UPV değerlerine neden olan tamamlanmamış

geopolimerleşme sebebiyle 7. gün sıcaklıkta elde edilmiştir. Kürlenme süresi, daha az kusur ve gözenek oluşumu sağlayarak UPV değerlerini olumlu şekilde etkilemiş ve en yüksek UPV değerlerine 56 günde varılmıştır. Kürlenme süresi uzadığında, termal kararlılık ve içyapı bütünlüğünde daha fazla iyileşme sağlanmıştır. 600°C sıcaklık maruz kaldıktan sonra 56. gün geopolimer numuneler UPV değerleri 3089-4338 m/s aralığında olduğunu, bu değerler 7 günlük ve 28 günlük geopolimer numunelerden büyük oranda yüksektir. Sıcaklığın artışıyla birlikte UPV değerlerindeki azalma, başlangıçta mikro çatlakların oluşumu, gözeneklerin genişlemesi ve dehidrasyon ile termal ayrışma nedeniyle bağlayıcı matrisin azalmasından kaynaklanmaktadır. 600°C'deki ciddi azalma, bu yüksek sıcaklıkta ciddi hasarların olduğunu göstermektedir. Ultrases geçiş hızı UPV sonuçları, mekanik dayanım sonuçları ile paralellik göstermektedir. 16M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numuneler, 12M ve 8M NaOH konsantrasyonlarına sahip numunelerden sırasıyla daha iyi performans göstermiştir.

Tablo 3.7. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harçların ortalama ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri

Numune	7 gün				28 gün				56 gün			
	Kon.	200°C	400°C	600°C	Kon.	200°C	400°C	600°C	Kon.	200°C	400°C	600°C
P50-8M	2919	2886	2713	2314	3647	3479	2512	2249	4298	4100	3497	3089
P40-8M	3002	2967	2825	2351	3775	3602	2640	2339	4493	4287	3399	3182
P30-8M	3090	3054	2823	2418	3848	3671	2876	2441	4491	4285	3533	3343
P20-8M	3317	3279	3028	2488	3991	3808	3023	2573	4535	4326	3784	3503
P10-8M	3544	3503	3691	2424	4105	3916	3194	2664	4672	4457	4052	3703
P0 -8M	3776	3733	3824	2489	4571	4361	3495	2862	5110	4875	4201	3765
P50-12M	3001	2966	2806	2384	3744	3571	2625	2312	4450	4245	3624	3203
P40-12M	3094	3058	2937	2517	3935	3754	2737	2443	4613	4401	3744	3280
P30-12M	3301	3264	2897	2523	3980	3797	2773	2551	4525	4317	3746	3413
P20-12M	3347	3309	3201	2553	4030	3845	3042	2649	4620	4408	3913	3569
P10-12M	3589	3548	3722	2660	4408	4205	3288	2708	5018	4787	4318	3680
P0 -12M	3949	3904	3896	2650	4645	4431	3671	2971	5319	5074	4466	3988
P50-16M	3194	3157	2942	2277	3931	3750	2703	2335	4540	4331	3732	3352
P40-16M	3357	3319	3038	2537	4083	3895	2775	2596	4756	4537	3913	3405
P30-16M	3367	3328	3210	2520	4110	3921	2969	2686	4656	4442	3920	3519
P20-16M	3574	3533	3328	2555	4212	4018	3099	2778	4939	4712	4254	3656
P10-16M	3852	3808	3789	2698	4677	4462	3620	3062	5146	4910	4503	3786
P0 -16M	4211	4162	4053	2752	5007	4777	3832	3089	5650	5390	4868	4338

Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra geopolimer numunelerin ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri üzerindeki pomza eklenmesinin etkisi incelendiğinde (Tablo 3.7), mekanik dayanım kayıplarına benzer bir davranış gözlemlenmiştir. Pomzasız numunelere kıyasla, %30'a kadar olan pomza ilavelerinde ultrases geçiş hızı (UPV) kayıpları yaklaşık olarak aynı seviyede kalmıştır. Bununla birlikte, %40 ve %50 pomza eklenmesiyle birlikte kayıplar artış göstermiştir. Yüksek sıcaklık dayanıklılığının sağlanması amacıyla, cüruf/uçucu kül bazlı geopolimer numunelerde %30 oranında pomza tozu kullanımı önerilmektedir.



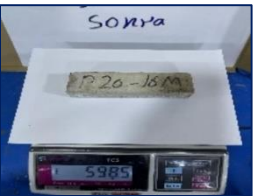
Şekil 3.7. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış geopolimer numunelerin farklı günlerdeki ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri

3.3.4. Yüksek Sıcaklıkta Ağırlık Kaybının İncelenmesi

Tablo 3.8’da yüksek sıcaklık etkisine (200, 400, 600°C) maruz kalan geopolimer harç numunelerin ortalama ağırlık kaybını (%) göstermektedir. Elde edilen sonuçları incelendiğinde sıcaklık arttıkça ağırlık kayıplarının da arttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, 16M konsantrasyonlarına sahip numuneler 12M ve 8M konsantrasyonlarına sahip numunelere göre daha az ağırlık kaybı göstermiştir. Sıcaklık arttıkça, bir dehidratasyon reaksiyonu ortaya çıkar ve nem iç kısımlardan dış kısımlara doğru hareket ederek bozulmaya ve ağırlık kaybına yol açar (Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. , 2007). Isıtma işleminin başlangıç aşamasında, alkali aktivasyonlarından ve su buharlaşmasından kaynaklanan bağlı su nedeniyle ağırlık kayıpları hızlı bir şekilde meydana gelir (Wang, Kai-tuo, He, Yan, Song, Xiao-ling, & Cui, Xue-min, 2015).

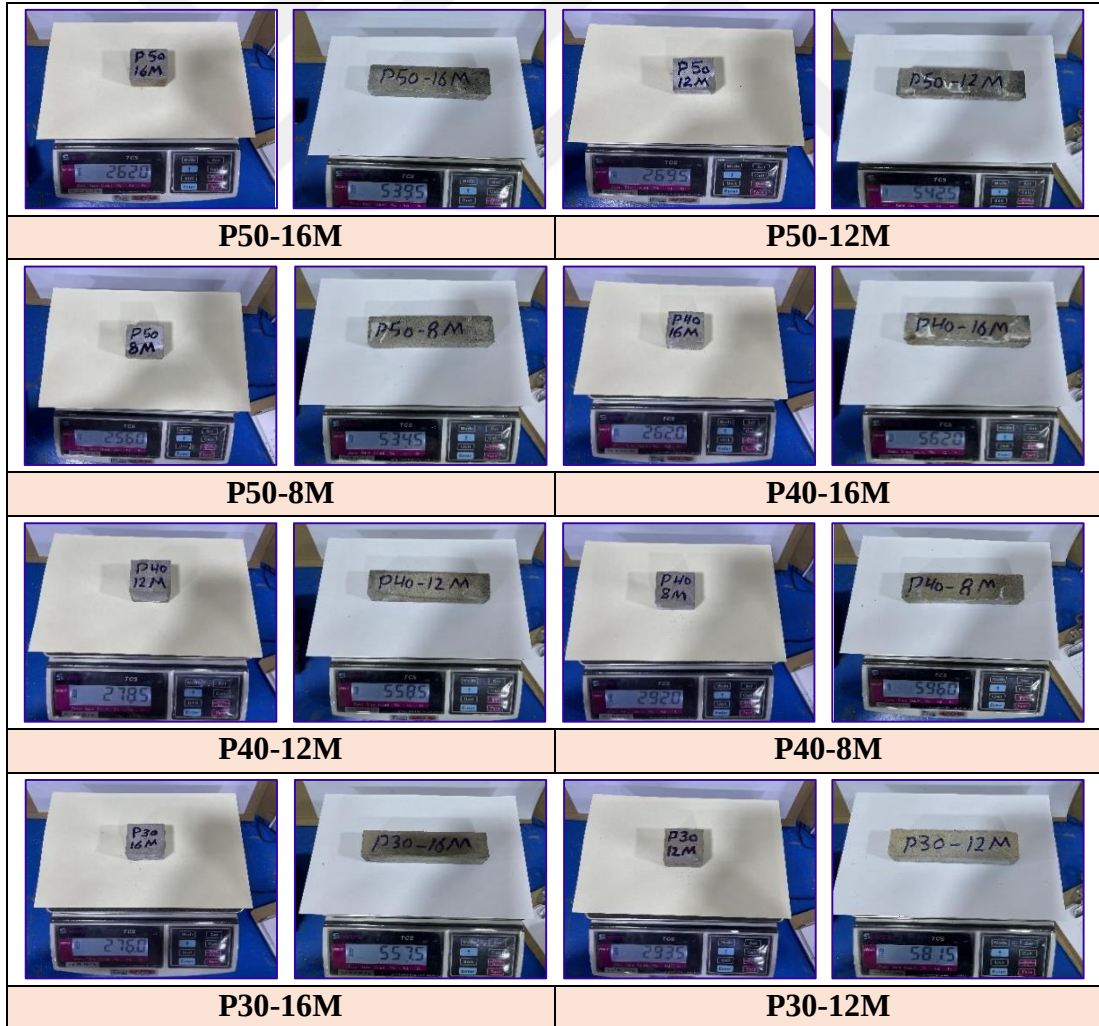
Tablo 3.8. Yüksek sıcaklık sonrası geopolimer harçların ortalama ağırlık kaybı (%).

Numune	200°C	400°C	600°C
P50-8M	1.82	4.87	8.95
P40-8M	1.79	5.17	7.95
P30-8M	1.76	5.47	7.43
P20-8M	2.10	5.42	6.96
P10-8M	2.08	5.00	6.52
P0-8M	2.08	4.61	6.12
P50-12M	1.81	4.83	8.88
P40-12M	1.77	5.13	7.89
P30-12M	1.75	5.43	7.38
P20-12M	2.08	5.38	6.91
P10-12M	2.06	4.95	6.45
P0-12M	2.05	4.20	6.05
P50-16M	1.79	4.80	8.81
P40-16M	1.75	5.07	7.81
P30-16M	1.72	5.36	7.27
P20-16M	2.05	5.30	6.81
P10-16M	2.03	4.88	6.36
P0-16M	2.36	4.48	5.94

			
P50-16M		P50-12M	
			
P50-8M		P40-16M	
			
P40-12M		P40-8M	
			
P30-16M		P30-12M	
			
P30-8M		P20-16M	
			
P20-12M		P20-8M	
			
P10-16M		P10-12M	

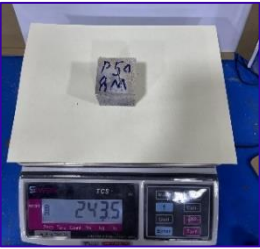
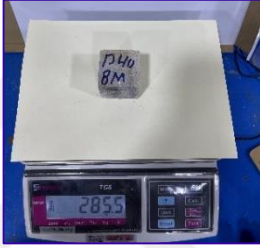


Şekil 3.8. 200°C sıcaklık maruz bırakıldıktan sonra numunelerin ağırlıkları





Şekil 3.9. 400°C sıcaklık maruz bırakıldıktan sonra numunelerin ağırlıkları

			
P50-16M		P50-12M	
			
P50-8M		P40-16M	
			
P40-12M		P40-8M	
			
P30-16M		P30-12M	
			
P30-8M		P20-16M	



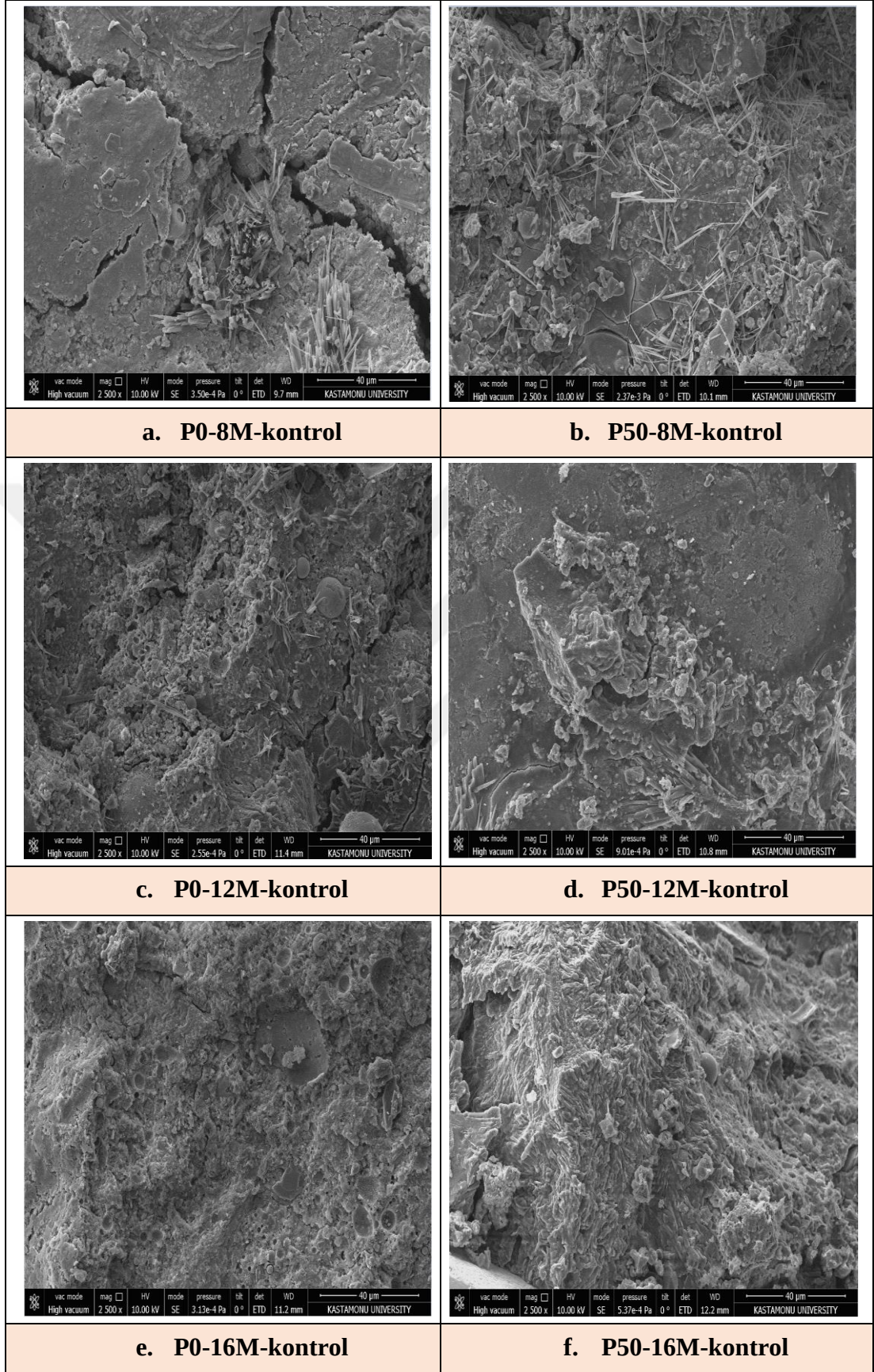
Şekil 3.10. 600°C sıcaklık maruz bırakıldıktan sonra numunelerin ağırlıkları

3.3.5. Yüksek sıcaklıktan önce numunelerin mikro yapısal İncelenmesi

Şekil 3.11'de farklı sodyum hidroksite konsantrasyonlarına (8M, 12M ve 16M) sahip geopolimer numunelerin, pomza ilavesiz (P0) ve %50 pomza ilavesi (P50) içeren numunelerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleriyle mikro yapısal

özelliklerini karşılaştırmaktadır. 56 günlük geopolimer numunelerin elementel bileşimini ve dağılımını gösteren Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) sonuçları ise Tablo 3.9'da özetlenmiştir. SEM görüntülerinde, gözenekler, jeopolimerik jeller, mikro çatlaklar ve reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş alümino-silikat partikülleri kolayca görülebilmesi için kullanılmaktadır.

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere, NaOH konsantrasyonunda değişim ve %50 pomza ilavesi, SEM mikrograflarında net bir şekilde görülen farklılıklara sebep olmuştur. 56 günlük SEM mikrograflarına göre, NaOH molaritesi 8M'den (Şekil 3.11.a) 12M'ye (Şekil 3.11.c) ve 16M'ye (Şekil 3.11.e) yükseldikçe çatlak yoğunluğunda önemli derecede azalma görülmüştür. Bununla birlikte, daha yüksek NaOH molariteleri ile reaksiyona girmemiş taneler, gözenekler, boşluklar ve iğne tipi etrenjit ürünleri görülmüştür. Molariteler yükseldiği zaman daha yoğun bir mikro yapı sağlanmıştır. SEM mikrograf sonuçları, 16M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numuneler daha yoğun iç yapı elde edilmesi bakımından mekanik dayanım sonuçlarına benzerdir. Şekil 3.11b, 3.11d ve 3.11f, sırasıyla 8M, 12M ve 16M NaOH konsantrasyonlarına sahip %50 pomza içeren geopolimer numunelerin göstermektedir. Pomza ilave edilmiş geopolimer numunelerin SEM mikrografları, daha fazla sayıda çatlak içeren homojen olmayan ve gözenekli bir mikro yapının elde edildiğini ortaya koymuştur. Çatlak yoğunluğu, reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş pomza tanelerinin sayısı, daha yüksek NaOH konsantrasyonu ile azalmıştır. Bunun yanında, daha yüksek NaOH konsantrasyonu için yaklaşık olarak tüm sodyum kristalleri jeopolimerleşme reaksiyonlarında tüketilmiştir. Kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, %50 pomza ilavesi içeren geopolimer numunelerde daha zayıf mikro yapılar gözlemlenmiştir. Benzer bir gözlem, daha önceki bir araştırmada da bulunmuştur; pomza parçacıklarının birbirine yakın halde olması, geopolimerlerde boşluklar ve zayıf arayüz oluşturarak daha kolay kırılmalara ve daha düşük mekanik dayanıma yol açmaktadır (Safari, Zrar, Kurda, Rawaz, Al-Hadad, Botan, Mahmood, Faraydon, & Tapan, Mucip, 2020). Daha zayıf bir içyapı ve daha fazla sayıda boşluk ve reaksiyona girmemiş parçacık, pomza ilavelerinden sonra dayanım incelendiğinde bir düşüşe sebep olmuştur. Aynı zamanda, geopolimer numunelerin mikrograflarında gözlemlenen mikro çatlaklar, jeopolimerik jel oluşumu esnasında oluşan büzülme çatlaklarına dayandırılabilir (Alehyen, S., Achouri, M. E. L., & Taibi, M., 2017).



Şekil 3.11. 56 Günlük geopolimer numunelerin SEM mikrografları

Tablo 3.9'da 56 günlük, pomzasız (P0) ve %50 pomza içeren (P50) geopolimer numunelerin enerjisi dağılımlı spektroskopisi (EDS) karakterizasyonlarını göstermektedir. Pomzanın ana temel bileşenleri, N-A-S-H'nin ek geopolimer ürünlerine katkıda bulunabilen Na, Al ve Si'dir. Geopolimer numunelerin bağlayıcısı, cüruf (Ca ve Si açısından zengin), uçucu kül ve pomza (Si ve Al açısından zengin) bileşiminden oluşmaktadır. Pomza eklendiğinde, bağlayıcıdaki kalsiyum oksit içeriği azalır ve bu azalma, uçucu kül/cüruf sistemi yerine %50 pomza eklendiğinde en yüksek seviyeye varır. Kalsiyum açısından zengin sistemler, düşük Ca/Si oranına sahip yüksek Al içeriği içeren C-A-S-H jelleri oluşturur. Diğer taraftan, silika açısından zengin sistemler, kalsiyum içeren N-(C)-A-S-H jelleri oluşturur (Srividya, T, PR, Kannan Rajkumar, Sivasakthi, M, Sujitha, A, & Jeyalakshmi, R, 2022). Tablo 3.9'da pik elementlerin Na, Al, Si ve Ca olduğunu ortaya koymaktadır. Yakın tarihli bir çalışmada, Ca/Si oranı arttıkça Si-OH bağlarının konsantrasyonunun azaldığı, Ca-OH bağlarının konsantrasyonunun ise arttığı açıklanmıştır. Bunun yanında, Ca/Si oranı yükseldikçe kusurların (boşluklar, gözenekler vb.) sayısı da artmaktadır (Duque-Redondo, E., Yamada, K., & Manzano, H., 2021). Buna ilaveten, bir başka çalışmada, silika zincirindeki daha az kusur, daha düşük polimerizasyon ve büyük jel gözenek hacmi sebebiyle 0,8 Ca/Si oranının mikromekanik özelliklerinin 1,2'den %10-30 daha üstün olduğunu belirtmiştir (Wang, J., ve diğerleri, 2022). EDS sonuçları, pomzasız 8M, 12M ve 16M numuneler için Ca/Si oranının sırasıyla 1,29, 0,95 ve 0,74 olduğunu, %50 pomza eklenmiş geopolimer numunelerin için ise Ca/Si oranının 8M için 1,31, 12M için 1,30 ve 16M için 0,81 olduğunu belirtmiştir. Pomzalı geopolimer numunelerin için NaOH konsantrasyonu arttıkça Ca/Si oranı azalmış, bu da en düşük boşlukların 16M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numunelerde elde edildiğini göstermiştir. EDS sonuçları ek olarak, pomza parçacıklarının birbirine yakın olduğunu ve bu durumun geopolimerlerde boşluklar ve birkaç zayıf arayüz oluşturarak daha kolay kırılmalara ve daha düşük dayanıma yol açtığını gösteren SEM bulgularını da güçlendirmektedir.

Ca/Si atomik oranının bununla birlikte, Si/Na atomik oranı da basınç dayanımı sonuçlarında etki göstermiştir. Belirli bir seviyeye kadar Si/Na oranının artmasıyla basınç dayanımının arttığı ifade edilmiştir (Küçükyıldırım, E., ve diğerleri, 2023). Bu araştırmada, pomzasız 8M, 12M ve 16M numuneler için Si/Na oranı sırasıyla 1.04, 1.37 ve 3.21 olarak bulunmuştur. %50 pomza eklenmiş numuneler için bu oran 8M

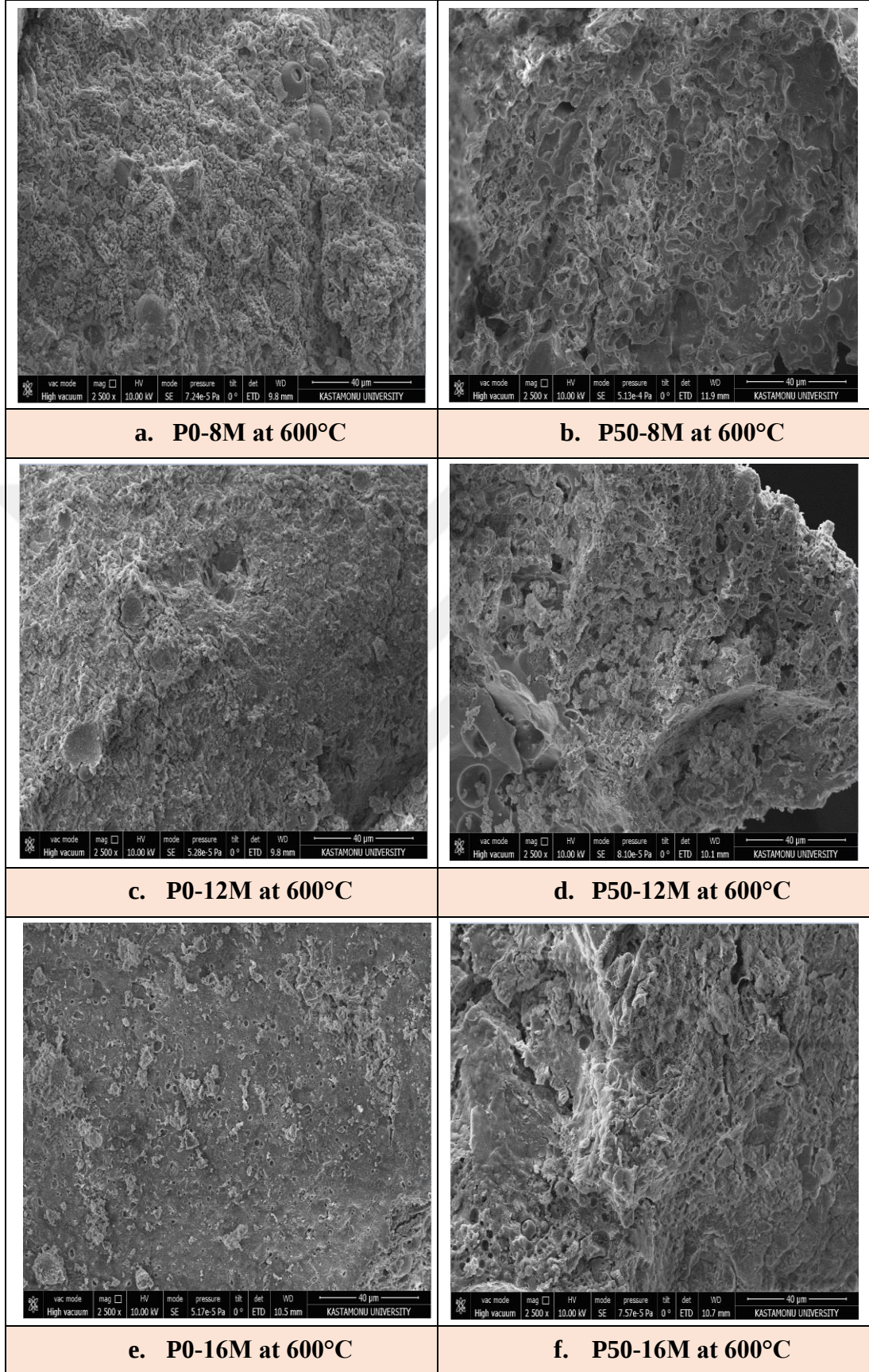
için 1.38, 12M için 1.42 ve 16M geopolimer numunelerin için 1.59 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, pomza ilavesiyle veya ilavesiz olarak Si/Na oranındaki artışla birlikte geopolimer numunelerinde basınç dayanımının artmasıyla da paralellik göstermektedir. EDS sonuçları, pomza içeren/içermeyen geopolimer numunelerinde Ca/Si ve Si/Na atomik oranlarının birbirine yakın olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, %50 pomza eklenmiş geopolimer numunelerin için Si/Al ve Na/Al atomik oranları daha yüksek bulunmuştur. Bu olay, pomzanın daha yüksek Na₂O içeriğine bağlanabilir. EDS sonuçları, basınç dayanımı ile Si/Al ve Na/Al atomik oranları arasında ters bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Si/Al ve Na/Al atomik oranları azaldıkça, geopolimer numunelerinde basınç dayanımları artmıştır.

Tablo 3.9. 56 Günlük geopolimer numunelerin EDS sonuçları

Element	P0-8M K	P0-12M K	P0-16M K	P50-8M K	P50-12M K	P50-16M K
	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %
C K	14,89	17,52	14,40	20,37	26,18	30,18
O K	47,59	51,22	52,14	49,69	47,22	43,18
NaK	7,79	5,97	3,34	5,77	5,12	5,25
MgK	0,56	0,60	0,51	0,32	0,30	0,59
AlK	2,76	3,76	6,12	1,16	1,51	2,41
SiK	8,08	8,19	10,73	7,98	7,29	8,34
S K	5,62	3,54	3,14	3,37	1,99	2,03
K K	0,45	0,30	0,36	0,14	0,22	0,29
CaK	10,42	7,80	7,97	10,49	9,47	6,72
TiK	0,38	0,32	0,35	0,14	0,16	0,24
PmL	0,37	0,20	0,23	0,14	0,15	0,23
MnK	0,19	0,13	0,12	0,11	0,12	0,11
FeK	0,91	0,45	0,61	0,31	0,26	0,45
Si/Na	1,04	1,37	3,21	1,38	1,42	1,59
Si/Al	2,93	2,18	1,75	6,88	4,83	3,46
Na/Al	2,82	1,59	0,55	4,97	3,39	2,18
Ca/Si	1,29	0,95	0,74	1,31	1,30	0,81

3.3.6. Yüksek sıcaklıktan sonra numunelerin mikro yapısal incelenmesi

Şekil 3.12'de, farklı geopolimer numunelerin 600°C'deki SEM mikrograflarını göstermektedir. Şekil 8'de, sol kısımlar pomzasız numuneleri, sağ kısımlar ise %50 pomza içeren geopolimer numuneleri göstermektedir. SEM mikrografları, 600°C'de oval boşlukların oluştuğunu ortaya koymuştur; bu olay, yüksek sıcaklıklarda geopolimer matrisinin viskoz sinterlemesinden kaynaklanan büyük hacim genişlemesinden doğmaktadır (He, P., Jia, D., Lin, T., Wang, M., & Zhou, Y. , 2010) (Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R., 2015). Oluşan boşluklar, geopolimer numunelerin mekanik dayanımını azaltmıştır. Bunun yanında, SEM görüntülerinde geopolimer matrisinin kısmi erimesi ve küresel gözenek oluşumu gözlemlenmiştir ve bu gözeneklerin varlığı, buharın geopolimer numunelerden uzaklaşmasını kolaylaştırarak yüksek sıcaklıkta hasarı azaltmakta ve böylece üstün bir sıcaklık direnci desteklemektedir. Daha düşük dayanıma sahip geopolimer numunelerin daha gözenekli olduğu ve bu gözeneklerin buhar çıkışı için daha fazla alan sağladığı açıktır. Bu şekilde, iç basınç boşalır ve matriste daha az hasar meydana gelir (Gultekin, A. & Ramyar, K., 2023). Bu olay SEM sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Bu küresel gözenekler, yapıdaki hızlı su buharlaşmasına bağlantı kurulabilir. Pomza içeren/içermeyen numuneler incelendiğinde, pomzasız numuneler %50 pomza içeren numunelerden daha iyi bir mikro yapı ortaya koymuştur. Erimiş kısımlar ve küresel boşluklar ve gözenekler, %50 pomza içeren geopolimer numunelerde daha fazla gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha yüksek NaOH molaritesi sahip numunelerde yoğun bir içyapı gözlemlenmiş ve yüksek sıcaklık sebebiyle oluşan boşlukların sayısı daha yüksek NaOH konsantrasyonunu için daha az belirlenmiştir; bu olay, yüksek NaOH molaritesine sahip geopolimer numunelerin daha yüksek basınç dayanımlarını açıklamaktadır.



Şekil 3.12. 600°C maruz bırakıldıktan sonra numunelerin SEM mikrografları

Tablo 3.10'de 600°C sıcaklıktaki geopolimer numunelerin EDS sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar, 600°C'ye maruz kaldıktan sonra temel bileşenlerin C, O, Na, Al, Si ve Ca olarak bulunduğunu belirtmiştir. Ca/Si oranı arttıkça kusurların (boşluklar, gözenekler ve diğerleri) sayısı da artar. 600°C'ye maruz kaldıktan sonra, pomzasız numunelerde Ca/Si oranı 8M için 1.29'dan 1.59'a, 12M için 0.95'ten 2.06'ya ve 16M için 0.74'ten 1.12'ye artmıştır. EDS sonuçları, 600°C'ye maruz kaldıktan sonra daha fazla kusurlar elde edildiği sonucunu doğrulamaktadır. Bunun yanında, %50 pomza içeren numuneler için Ca/Si oranı 8M için 1.31'den 0.80'e, 1.30'dan 0.38'e ve 0.81'den 0.79'a azalmıştır. %50 pomza içeren numunelerde, yüksek sıcaklık maruz kaldıktan sonra Ca/Si oranı azalmıştır. Bu durumun sebebi, pomza bazlı matrisin kısmen eriyerek daha önce geopolimerleşme ürünleriyle doldurulmamış bazı gözenekleri iyileştirmesidir. Ayrıca, belirli bir seviyeye kadar Si/Na oranındaki artış daha yüksek bir basınç dayanımı desteklemiştir. Yüksek sıcaklık sebebiyle, pomzasız numunelerde Na/Si oranı 8M için 1.04'ten 0.53'e ve 16M için 3.21'den 1.94'e düşmüştür. %50 pomza içeren numunelerde ise, yüksek sıcaklık sebebiyle Si/Na oranı 12M için 1.42'den 1.00'e ve 16M için 1.59'dan 1.17'ye düşmüştür. Bu bulgular, basınç dayanımı sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Bunun birlikte, yüksek sıcaklıktan sonra pomzasız numuneler için Si/Al ve Na/Al atomik oranı ile basınç dayanımı arasında negatif bir ilişki elde edilmiştir. Si/Al ve Na/Al atomik oranlarındaki azalma, basınç dayanımını geliştirmiştir. Ama, bu eğilim yüksek sıcaklıktan sonra pomza bazlı geopolimer numuneler için net değildir.

Tablo 3.10. 600°C sıcaklıkta maruz kalan geopolimer numunelerin EDS sonuçları

Element	P0-8M-S	P0-12M-S	P0-16M-S	P50-8M-S	P50-12M-S	P50-16M-S
	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %
C K	18,63	18,16	15,59	5,04	19,01	12,37
O K	47,21	53,36	47,26	53,20	43,37	50,90
NaK	10,45	3,12	4,97	6,62	11,64	8,98
MgK	0,64	0,59	0,73	0,99	0,24	0,57
AlK	3,18	2,22	4,09	3,58	1,45	3,64
SiK	5,55	5,67	9,66	14,46	11,65	10,54
S K	4,36	3,81	4,78	2,98	7,25	3,5
K K	0,21	0,23	0,43	0,37	0,30	0,31
CaK	8,81	11,69	10,81	11,52	4,4	8,34
TiK	0,19	0,30	0,35	0,19	0,15	0,19
PmL	0,18	0,21	0,38	0,11	0,11	0,13
MnK	0,11	0,15	0,24	0,16	0,15	0,11

FeK	0,49	0,48	0,74	0,78	0,27	0,43
Si/Na	0,53	1,82	1,94	2,18	1,00	1,17
Si/Al	1,75	2,55	2,36	4,04	8,03	2,90
Na/Al	3,29	1,41	1,22	1,85	8,03	2,47
Ca/Si	1,59	2,06	1,12	0,80	0,38	0,79

3.4. Kimyasal Durabilite Etkisine Maruz Numuneler Yapılan Test Sonuçları

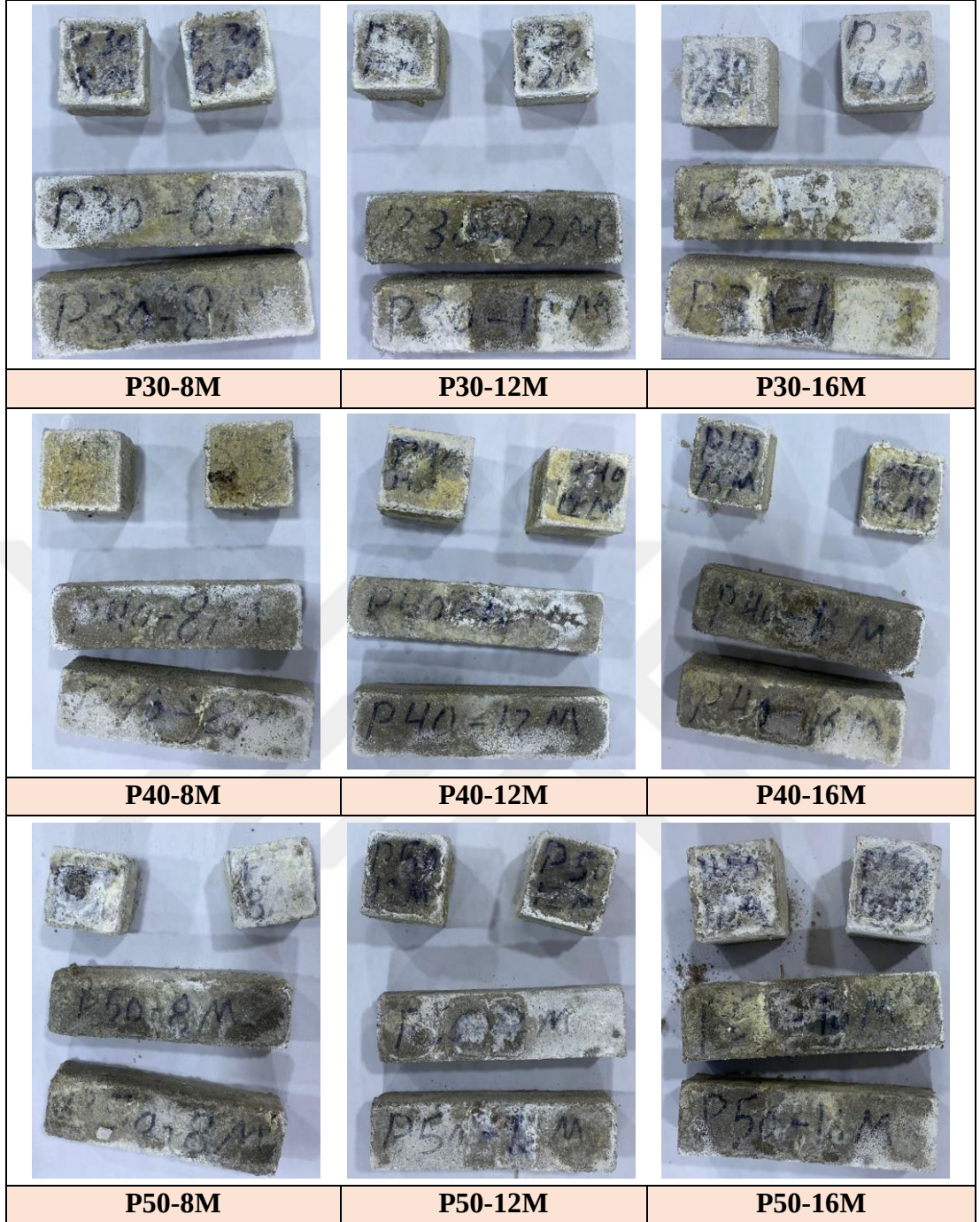
3.4.1. Kimyasal Durabilite Sonrası Görsel İnceleme Sonuçları

Şekil 3.13'te 56 gün boyunca %5 sülfürik asit etkisine (H_2SO_4) maruz kalan farklı NaOH molaritelerine sahip pomza tozu katkılı geopolimer harçların yüzey görüntüleri verilmiştir. Numune yüzeyinde oluşan değişim %5 magnezyum sülfat çözeltisi dolayısıyla oluşan değişimden çok daha fazla olduğu için %5 sülfürik asit etkisi sonrası fotoğraflar eklenmiştir. Elde edilen görsel inceleme sonuçlarına göre, pomza katkılı geopolimer harç numunelerin renklerinin griden beyaza döndüğü, yüzey pürüzlülüğünde ve yumuşamada artış gözlemlendiği ve numunelerin en dış yüzeylerinde aşınma ve erozyon belirtileri görüldüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca bazı geopolimer harç numunelerinde 56 günlük %5 sülfürik asit etkisi sonrasında yüzeyde mikro çatlaklar ve harç kaybı gözlemlenmiştir. Genel olarak ise geopolimer harç numunelerin yüzeylerinde az miktarda aşınma gözlemlenmiştir. Geopolimer harç numunelerinin NaOH molaritesi birbiri ile karşılaştırıldığında, 16M NaOH molaritye sahip geopolimer harçlarda gözlemlenen beyaz alçıtaşı oluşumunun ve yüzey aşınmasının 8M ve 12 NaOH molaritelerine sahip numunelerden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Diğer tarafta 8M ve 12M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numunelerde ise hemen hemen birbirine benzer beyaz oluşumlar (alçıtaşı) ve yüzey erozyonu gözlemlenmiştir. Ayrıca geopolimer harçlara bazaltik pomza tozu eklenmesi sonucunda alçıtaşı oluşumunda görsel olarak belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. 16M NaOH molaritesine sahip numunelerde daha fazla gözlemlenen alçıtaşı oluşumunun sebebi ise asit ortamında kalsiyum-alüminyum bileşiklerinin daha hızlı çözünmesine ve akabinde alçıtaşı oluşumuna bağlanabilir.

Ayrıca, 56 gün boyunca %5 magnezyum sülfata ($MgSO_4$) maruz bırakılan bazaltik pomza katkılı geopolimer numuneler orijinal yüzey rengini korumuş olup, %5 sülfürik asit çözeltisine kıyasla çok daha düşük miktarda alçıtaşı oluştuğu gözlemlenmiştir.

56 gün boyunca %5 magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan geopolimer harç numunelerinde belirgin bir mikro çatlak oluşumu ve yüzeyden dökülmeler görülmemiştir. Kimyasal reaksiyonlardan dolayı numunelerin yüzeylerinde yumuşama gözlenmiştir. Fakat pomza katkılı geopolimer harç numuneleri %5 magnezyum sülfat saldırısı sonrası bozulma ve çatlama olmadan yapısal bütünlüğünü korumuştur. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimer harç numuneler için %5 sülfürik asit saldırısının, %5 magnezyum sülfat saldırısından daha tehlikeli olduğu ortaya çıkmıştır.





Şekil 3.13. 56 gün boyunca %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat etkilerine maruz kalmış geopolimer numunelerin görsel incelenmesi

Pomza oranı arttıkça geopolimer numunelerdeki alçı taşı oluşumu azalması çeşitli faktörlere bağlanabilir. Birincisi, pomzanın geopolimer reaksiyonlarına daha az ve geç katılması, sülfat ve asit saldırılarına karşı daha az reaksiyon ürünü oluşumuna yol açmaktadır. Pomzanın doğal gözenekli yapısı, agresif kimyasal çözeltilerin daha derinlere nüfuz etmesini sağlayarak yüzey birikimini azaltır. Ayrıca bazaltik pomzanın düşük alkali ve kalsiyum içeriği, alçı taşı ve etrenjit gibi beyazlaşmaya neden olan beyaz tortu ürünlerinin oluşumunu sınırlayabilmektedir. Pomzanın yüksek silika

içeriği sayesinde kimyasal ortamlara karşı daha dayanıklı bir yapı oluşabilir. Geopolimer numunelerde pomza parçacıklarının oluşturduğu fiziksel bariyer, kimyasal çözeltinin geçirgenliğini yavaşlatarak beyaz tortu oluşumunu azaltabilir. Ayrıca geopolimerizasyon sırasında pomzanın daha yavaş reaksiyona girmesi sebebiyle daha düşük ısı oluşumu sonrasında numunelerdeki mikro çatlak oluşumunu azaltır. Bu da asitlerin daha az numune içerisine nüfus etmesine ve dolayısıyla daha az bozulmaya işaret etmektedir. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde pomza içeriği arttıkça geopolimer numunelerde daha az alçıtaşı oluşumuna sebep olabilir.

3.4.2. Kimyasal Durabilite Sonrası Ağırlık Değişimi Sonuçları

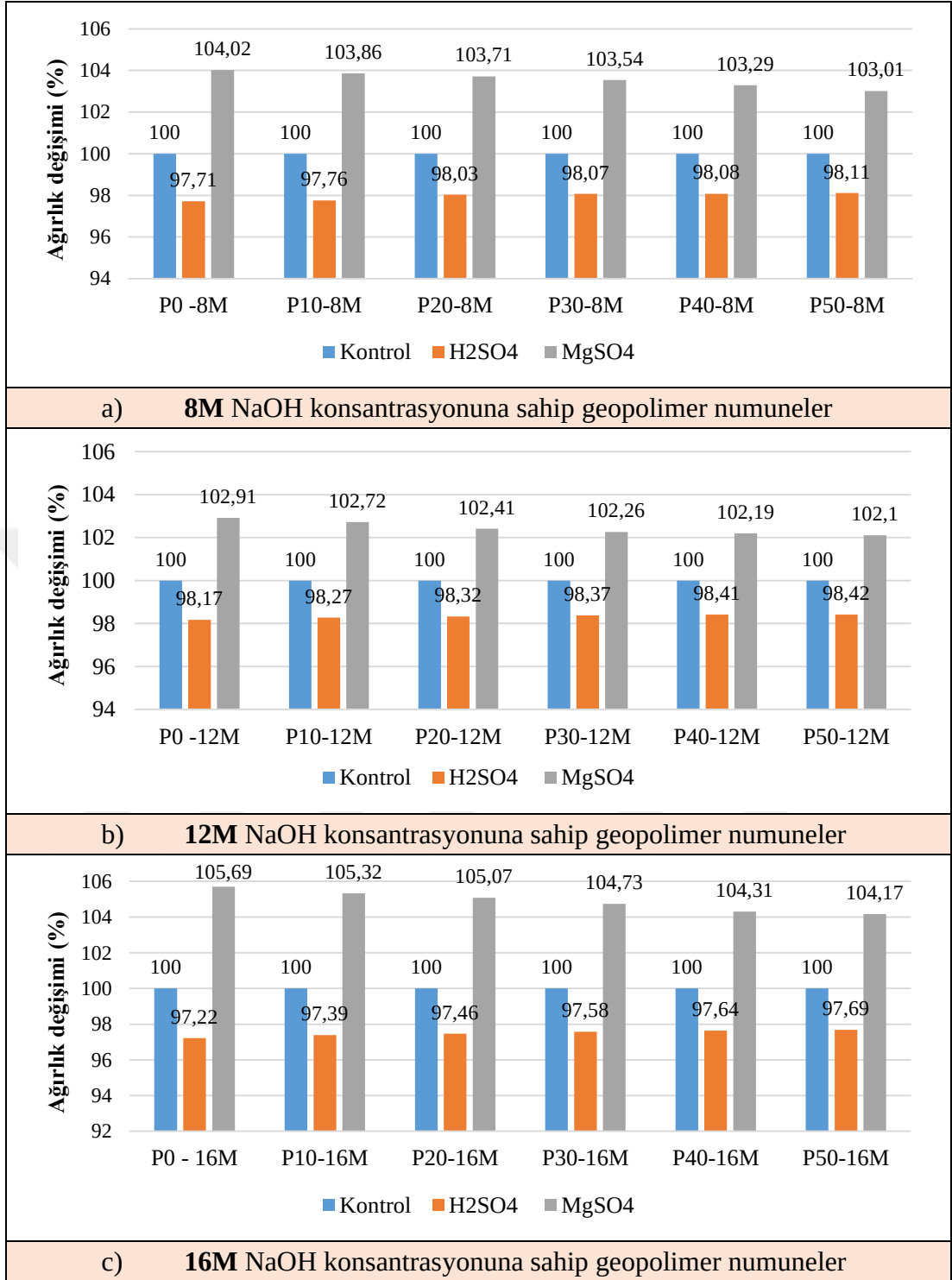
Tablo 3.11 ve Şekil 3.14'te 56 gün boyunca %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat etkileri sonrasında numune ağırlıklarında meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, numune ağırlıkları %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında artış meydana gelirken, %5 sülfürik asit etkisi sonrasında ise numune ağırlıklarında azalma meydana gelmiştir. Kimyasal solüsyona maruz kaldığı ilk aşamada, kimyasal çözelti emiliminden dolayı pomza katkılı geopolimer harc numunesi ağırlıklarında bir artış beklenmektedir. Ağırlık artışı sonrasında sürekli devam eden kimyasal reaksiyonlardan dolayı etrenjit oluşumu ve geopolimer yüzeylerinde gerçekleşen aşınmalar ve matris dökülmesi sebebiyle numuneler ağırlıklarını kaybetmeye başlamıştır (Duxson, et al., 2007) (Al Bakri, ve diğerleri, 2011). Genel olarak kimyasal saldırılardan kaynaklanan bozulma, geopolimer numune yüzeylerinde başlar ve daha sonra geopolimer numunelerin çekirdek kısımlarına doğru devam eder. Bu nedenle, kimyasal saldırılardan sonra meydana gelen ağırlık kaybının olası sonuçları yüzey erozyonu, matris kaybı ve numune parçalanmasıdır.

Tablo 3. 11. %5 sülfürik asit ve magnezyum sülfat sonrası numune ağırlıklarındaki değişim

Numuneler		Kontrol (g)	H ₂ SO ₄ (g)	H ₂ SO ₄ sonrası ağırlık değişimi (%)	MgSO ₄ (g)	MgSO ₄ sonrası ağırlık değişimi (%)
8M	P0-8M	295	288.24	-2.29	306.86	4.02
	P10-8M	294	287.41	-2.24	305.35	3.86
	P20-8M	292	286.25	-1.97	302.83	3.71
	P30-8M	289	283.43	-1.93	299.23	3.54
	P40-8M	285	279.53	-1.92	294.38	3.29
	P50-8M	280	274.72	-1.89	288.43	3.01

12M	P0 -12M	298	292.56	-1.83	306.67	2.91
	P10-12M	297	291.86	-1.73	305.08	2.72
	P20-12M	294	289.06	-1.68	301.09	2.41
	P30-12M	291	286.25	-1.63	297.58	2.26
	P40-12M	287	282.44	-1.59	293.29	2.19
	P50-12M	282	277.05	-1.58	287.92	2.10
16M	P0 -16M	303	294.56	-2.78	320.25	5.69
	P10-16M	301	293.14	-2.61	317.02	5.32
	P20-16M	298	290.43	-2.54	313.11	5.07
	P30-16M	295	288.39	-2.42	308.95	4.73
	P40-16M	290	283.16	-2.36	302.50	4.31
	P50-16M	284	277.44	-2.31	295.84	4.17

Şekil 3.14.a'da 8M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numunelerin kimyasal saldırı sonrası ağırlık değişimlerini göstermektedir. 56 gün boyunca %5 sülfürik asit etkisinden sonra geopolimer numunelerde gözlemlenen ağırlık kaybı %1,89 (%50 pomza ile) ile %2,29 (pomzasız) arasında değişmiştir. Şekil 3.14 b ve 3.14 c'de görüleceği gibi, %5 sülfürik asit etkisinden sonra P50-12M (%50 pomzalı) numunelerde ağırlık kaybı %1,58, P0-12M (pomzasız) numunelerde %1,83 olurken, P50-16M (%50 pomzalı) numunelerinde ise ağırlık kayıpları %2,31 ve P0-16M (pomzasız) numunelerinde %2,78 olmuştur. Buna karşılık, 56 gün boyunca %5 magnezyum sülfat saldırısından sonra geopolimer numunelerde solüsyon emiliminden dolayı numune ağırlıklarındaki artış %3,01 (%50 pomzalı) ile %4,02 (pomzasız) arasında değişmiştir. %5 magnezyum sülfat sonrasında ağırlık artışı P50-12M numuneleri için %2,10, P0-12M numuneleri için %2,91, P50-16M numuneleri için %4,17 ve P0-16M numuneleri için %5,69 olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, pomza oranı arttıkça asit etkisi sonrasında ağırlık kaybının azaldığını, magnezyum sülfat etkisi sonrası ise ağırlık artışının azaldığını göstermiştir. Kimyasal saldırı sonrasında numunelerin ağırlıklarındaki yüksek artış veya azalışın, numunelerin bu saldırıdan çok etkilendiğine dair bir işarettir. Pomza kullanımı kimyasal etki sonrasında numunedeki ağırlık artışını ve kaybını azalttığı için kimyasal durabilite için iyi bir performans göstermiştir.



Şekil 3.14. 56 gün boyunca sülfürik asit ve magnezyum sülfat etkilerine maruz kalmış geopolimer numunelerde ağırlık değişimi %

Asit etkisinden kaynaklanan ağırlık kayıpları, çevredeki yoğun asit ortamından dolayı geopolimer numunelerdeki alkali çözünmesine bağlanabilir. Pomza tozu içermeyen geopolimer numunelerdeki yüksek CaO içeriği nedeniyle asit sonrası daha fazla ağırlık kaybı göstermiştir. Bunun sebebi, kalsiyum oksit in reaksiyonu sonrasında katı hacmi neredeyse iki kat artırarak alçı ve etrenjit oluşumlarını hızlandırması

gösterilebilir (Wallah, Steenie & Rangan, B Vijaya, 2006) (Bakharev T. , 2005). Bu sebepten dolayı geopolimer numunelerde çekme gerilmeleri çekme dayanımına kadar artmakta, daha sonra çekme mukavemetinin aşılması sonucu numunelerde çatlama ve malzeme çözünmesi ortaya çıkmaktadır. Pomza katkılı geopolimer numunelerdeki daha düşük ağırlık kaybı, düşük CaO içeriğine bağlanabilir, bu da daha az alçıtaşı ve etrenjit oluşumuyla sonuçlanır. Bu etki, daha yüksek oranda pomza eklendikçe daha fazla görülmüştür.

%5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında geopolimer harç numunelerinin ağırlıklarında artış gözlemlenmiştir. Genel olarak magnezyum sülfat solüsyonundaki magnezyum iyonları geopolimer numunelere yayılmaktadır. Burada C_3A , sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit oluşturur, bu da geopolimer numunelerin genişlemesine (ağırlık artışı) ve bozulmasına neden olmaktadır (Thokchom, S , Ghosh, P, & Ghosh, S , 2010) (Al-Dulaijan, ve diğerleri, 2003) (Al-Amoudi, 2003) (Kabay, N., Tufekci, M. M., Kizilkanat, A. B., & Oktay, D., 2015). Bu sebepten dolayı pomza ilaveli geopolimer numuneler %5 magnezyum sülfat ortamında daha az ağırlık artışı göstermiştir.

Ayrıca, NaOH molaritesinin ağırlık değişimi sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, kimyasal etkiye bağlı en düşük ağırlık artışı veya ağırlık azalması 12M NaOH numunelerinde meydana gelmiştir. Buna karşılık en yüksek ağırlık değişimi ise 16M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numunelerde elde edilmiştir. Genel olarak artan NaOH molaritesi, C-S-H ve N-A-S-H jel oluşumlarını artırır, geopolimer numunelerin gözenekliliğini azaltarak, numunelerin geçirgenliğini ve mekanik dayanımını artırır. Fakat 12M değerinin üzerinde artan NaOH molaritesi, asit saldırısından sonra ağırlık kaybını ve sülfat saldırısından sonra ise ağırlık artışını artırmıştır. Bu sebepten ötürü, geopolimer numunelerin kimyasal dayanıklılığı için optimum NaOH molaritesi 12M olarak bulunmuştur.

3.4.3. Kimyasal Durabilite Sonrası Basınç Dayanımı Sonuçları

Tablo 3.12’de ve Şekil 3.15’te 56 gün boyunca %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat etkisine maruz kalan pomza katkılı geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı sonuçları ve farklı NaOH konsantrasyonu etkisinde basınç dayanımlarındaki değişimler verilmiştir. Kimyasal etki sonrasında elde edilen sonuçlara göre, %5 sülfürik asit sonrası oluşan basınç dayanım kayıplarının %5

magnezyum sülfat sonrası olan basınç dayanımı kayıplarına göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca karışıma pomza ikame edilmesi, kimyasal etki sonucu oluşan basınç dayanım kaybını azaltarak kimyasal etkilere karşı iyi bir performans sergilemiştir. %5 sülfürik asit etkisi sonrasında basınç dayanımındaki azalma P0-8M (pomzasız) için %35,92 iken, P50-8M (%50 pomza katkılı) numuneler için %33,08'e kadar düşmüştür, (Şekil 3.15a). Geopolimer harç numunelere her %10 oranında bazaltik pomza ikamesi, asit sonrası artık basınç dayanımlarını artırmaktadır ve en yüksek artık basınç dayanımı %50 pomza oranı ikameli numunelerde elde edilmiştir. Benzer şekilde, 56 gün boyunca %5 sülfürik asit saldırısı nedeniyle basınç dayanımındaki azalma, P0-12M numuneleri için %31,88 ve P50-12M numuneleri için %28,12 olarak bulunmuştur, (Şekil 3. 15b). Bu arada P0-16M numuneleri için basınç dayanımındaki azalma %39,97 iken, P50-16M numuneleri için ise %36,70 olarak bulunmuştur, (Şekil 3. 15c).

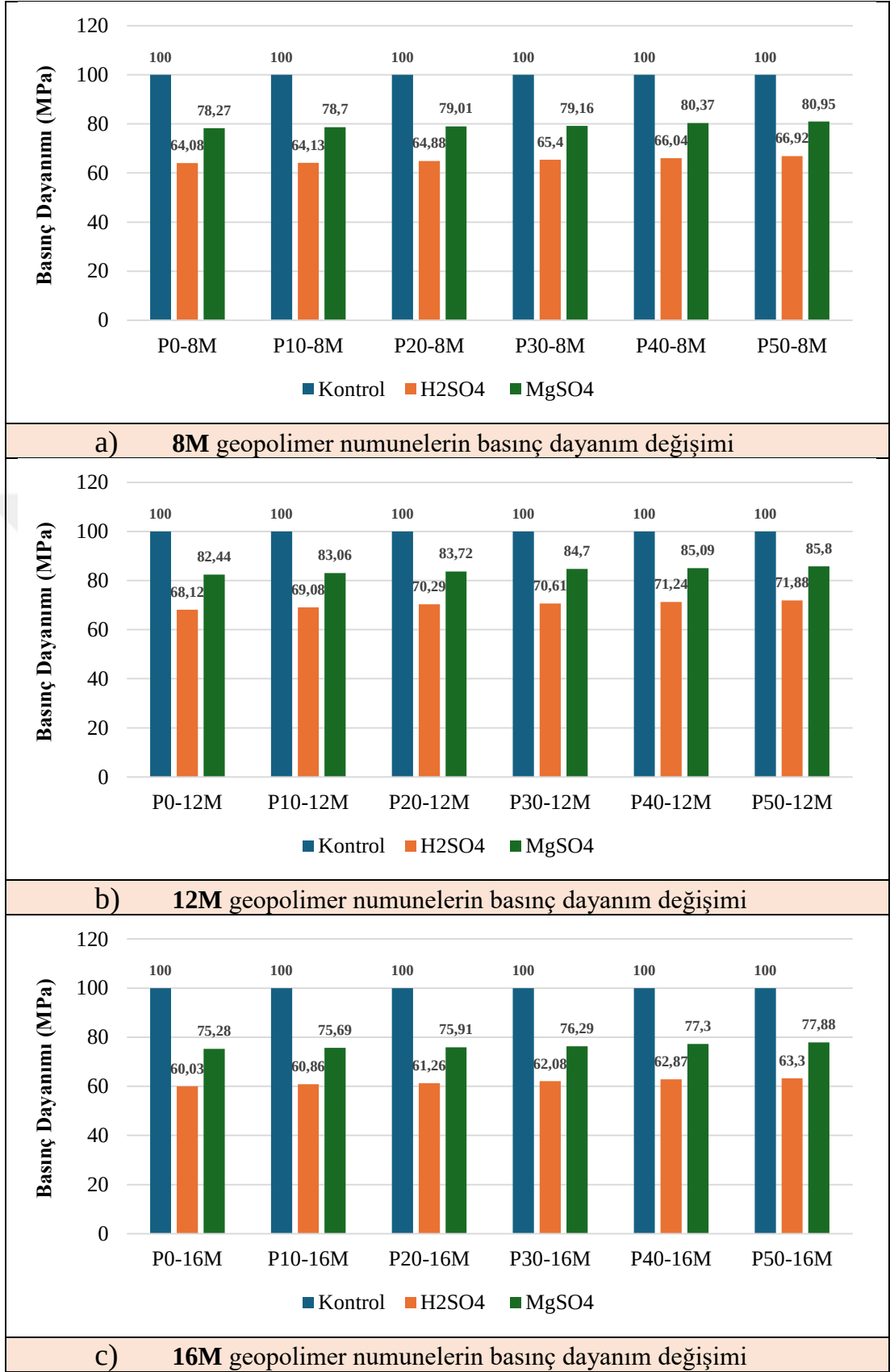
Tablo 3.12. Geopolimer harç numunelerinin %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat sonrası basınç dayanımları

Molarite	Numune	Kontrol (MPa)	H ₂ SO ₄ (MPa)	H ₂ SO ₄ sonrası basınç dayanımı değişimi (%)	MgSO ₄ (MPa)	MgSO ₄ sonrası basınç dayanımı değişimi (%)
8M	P0-8M	53.46	34.26	35.92	41.84	21.73
	P10-8M	46.85	30.04	35.87	36.87	21.30
	P20-8M	44.77	29.05	35.12	35.37	20.99
	P30-8M	44.11	28.85	34.60	34.92	20.84
	P40-8M	40.14	26.51	33.96	32.26	19.63
	P50-8M	41.19	27.56	33.08	33.34	19.05
12M	P0-12M	56.61	38.56	31.88	46.67	17.56
	P10-12M	52.07	35.97	30.92	43.25	16.94
	P20-12M	46.06	32.38	29.71	38.56	16.28
	P30-12M	44.63	31.48	29.39	37.80	15.30
	P40-12M	45.95	32.73	28.76	39.10	14.91
	P50-12M	43.48	31.25	28.12	37.31	14.20
16M	P0-16M	61.62	36.99	39.97	50.79	24.72
	P10-16M	54.01	32.87	39.14	40.88	24.31
	P20-16M	50.88	31.17	38.74	38.62	24.09
	P30-16M	46.60	28.93	37.92	35.55	23.71
	P40-16M	48.11	30.25	37.13	37.19	22.70
	P50-16M	44.85	28.39	36.70	34.93	22.12

Geopolimer numunelerde 56 gün boyunca %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında ise P0-8M, P0-12M ve P0-16M numunelerindeki basınç dayanım kayıpları

sırasıyla %21,73, %17,56 ve %24,72 olarak elde edilmiştir. Geopolimer numunelere her %10 oranında bazaltik pomza katılması, %5 magnezyum sülfat sonrası artık (kalan) basınç dayanım sonuçlarını artırmıştır ve en yüksek artık basınç dayanımları %50 pomza tozu ikameli geopolimer harç numunelerde elde edilmiştir. %5 magnezyum sülfat sonrası basınç dayanımındaki azalmalar P50-8M, P50-12M ve P50-16M geopolimer numuneleri için sırasıyla %19,05, %14,20 ve %22,12 olmuştur. Sonuçlar, geopolimer numunelerde artık basınç dayanımının artan bazaltik pomza ikamesi oranıyla arttığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca 56 gün sonunda %5 sülfürik asit saldırısı geopolimer numunelerin basınç dayanımını yaklaşık %40'a kadar düşürürken, 56 gün boyunca %5 magnezyum sülfat saldırısı geopolimer numunelerin basınç dayanımını yaklaşık %25'e kadar düşürmüştür. Bu sonuçlara ek olarak, en iyi sülfürik asit ve magnezyum sülfat dirençleri 12M konsantrasyona sahip geopolimer numunelerde elde edilirken, en düşük asit ve sülfat performansları ise 16M konsantrasyona sahip geopolimer numunelerde elde edilmiştir, Şekil 3. 14.

Geopolimer numunelerin sülfürik asit (H_2SO_4) saldırısından dolayı bozulma mekanizması, asit ortamı nedeniyle ortaya çıkan N-A-S-H ve C-S-H jellerinin oksialüminyum köprüsünün tahrip olması ve böylece Ca/Si oranının azalmasına bağlanabilir (Ariffin, MAM, Bhutta, MAR, Hussin, MW, Tahir, M Mohd, & Aziah, Nor, 2013) (Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S., 2017). Serbest kalsiyum, geopolimer numunelerde etrenjit ve alçıtaşı oluşumuna neden olabilir ve bu oluşum sonucunda da geopolimer numunelerde dökülme, çatlama ve mukavemet kaybı meydana gelmektedir (Ariffin, MAM, Bhutta, MAR, Hussin, MW, Tahir, M Mohd, & Aziah, Nor, 2013) (Bassuoni, MT & Nehdi, ML, 2007) (Shi, Roy, D., & Krivenko, P., Alkali-Activated Cements and Concretes, 2003). Ayrıca sülfürik asit çözeltilerindeki sülfatlar geopolimer matrisin içine nüfuz ederek sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile reaksiyona girerler. Bunun sonucunda da etrenjit formları oluşarak daha düşük bir basınç mukavemeti elde edilir (Bakharev T. , 2005). Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) saldırısında da geopolimer numunelerde başlangıç aşamalarında magnezyum sülfatın zararlı etkilerini azaltan Brusit oluşmaktadır (Bondar, Dali, Lynsdale, CJ, Milestone, NB, & Hassani, N, 2015). Fakat daha sonraki aşamalarda C-S-H, M-S-H'ye (magnezyum silikat hidrat) dönüşerek numune yüzeylerinde yumuşama ve daha düşük mekanik dayanıma neden olmaktadır (Türker, F. , Aköz, F, Koral, S., & Yüzer, N., 1997).



Şekil 3.15. 56 gün boyunca sülfürik asit ve magnezyum sülfat etkilerine maruz kalmış geopolimer numunelerde basınç dayanımlarının değişimi %

Elde edilen sonuçlara göre, bazaltik pomza tozu içeren geopolimer numuneleri, pomza içermeyen geopolimer numunelere kıyasla sülfürik asit ve magnezyum sülfat ortamlarında daha iyi davranış sergilemiştir. Bazaltik pomza tozu oranı arttıkça kimyasal etki sonrası geopolimer numunelerindeki basınç dayanımı kaybı azalmıştır. Farklı molaritelerle üretilen geopolimer numuneler arasında sülfürik asit ve magnezyum sülfat ortamlarında en iyi performansı 12M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numuneler gösterirken, en kötü performansı ise 16M NaOH konsantrasyonuna sahip geopolimer numuneler göstermiştir. Yapılan başka bir literatür çalışmasında, NaOH konsantrasyonunun geopolimer numunelerin asit direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 8M, 10M, 12M ve 14M NaOH çözeltileri ile hazırlanan geopolimer numuneleri arasında 12M NaOH'a sahip geopolimer numunelerin asit etkisine karşı en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir (Kumaravel, S & Giriya, K, 2013). Yaptığımız çalışmada da literatür bulgularını destekler niteliktedir.

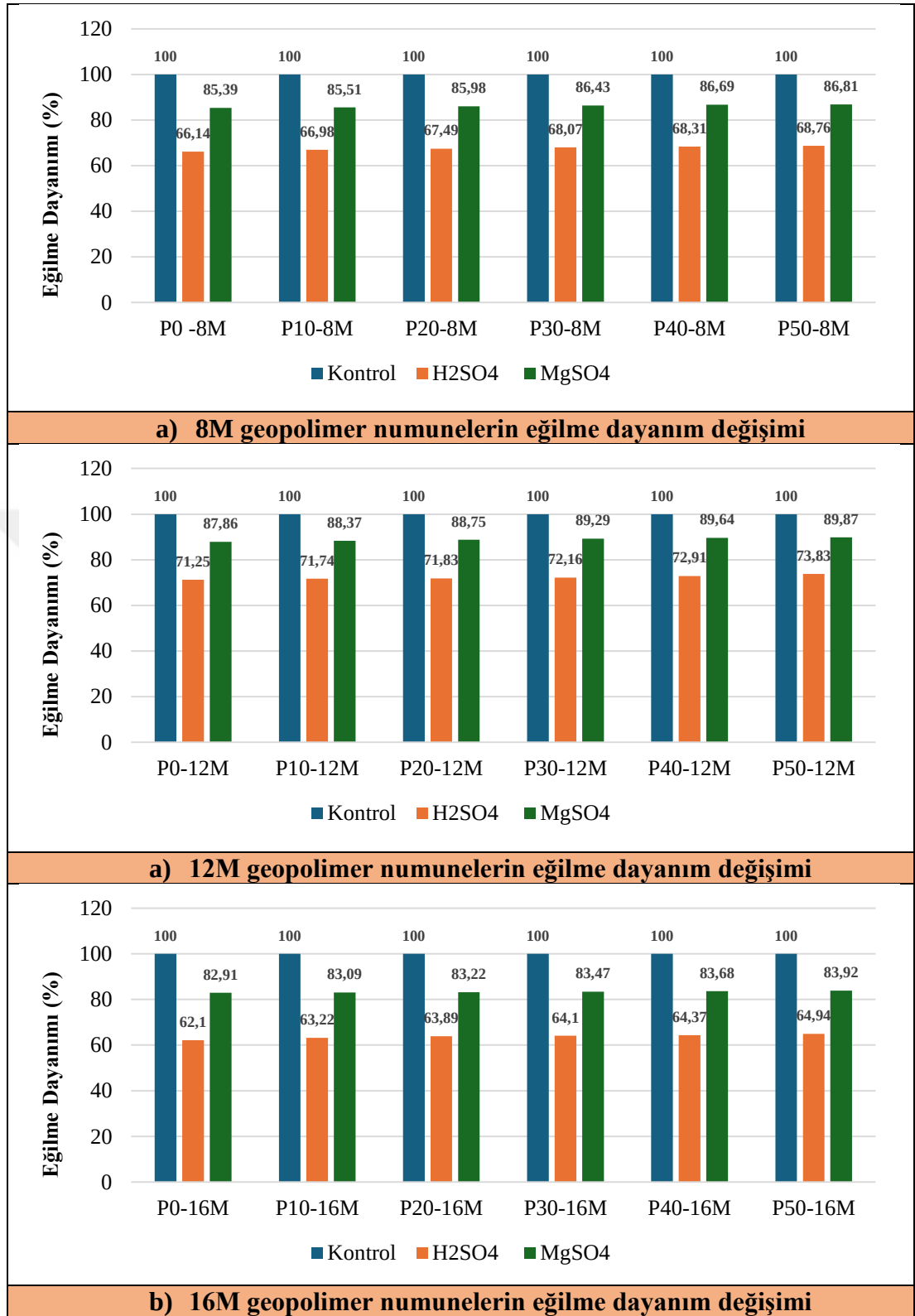
3.4.4. Kimyasal Durabilite Sonrası Eğilme Dayanımı Sonuçları

Tablo 3.13'de ve Şekil 3.16'da 56 gün boyunca %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat etkisine maruz kalan pomza katkılı geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı sonuçları ve farklı NaOH konsantrasyonu etkisinde eğilme dayanımlarındaki değişimler verilmiştir. Kimyasal etki sonrasında elde edilen sonuçlara göre, %5 sülfürik asit sonrası oluşan eğilme dayanım kayıplarının %5 magnezyum sülfat sonrası olan eğilme dayanımı kayıplarına göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca karışıma pomza ikame edilmesi, kimyasal etki sonucu oluşan eğilme dayanım kaybını azaltarak kimyasal etkilere karşı iyi bir performans sergilemiştir. %5 sülfürik asit etkisi sonrasında eğilme dayanımındaki azalma P0-8M (pomzasız) için %33,86 iken, P50-8M (%50 pomza katkılı) numuneler için %31,24'e kadar düşmüştür, (Şekil 3.16a). Geopolimer harç numunelere her %10 oranında bazaltik pomza ikamesi, asit sonrası artık eğilme dayanımlarını artırmaktadır ve en yüksek artık eğilme dayanımı %50 pomza oranı ikameli numunelerde elde edilmiştir. Benzer şekilde, 56 gün boyunca %5 sülfürik asit saldırısı nedeniyle eğilme dayanımındaki azalma, P0-12M numuneleri için %28,75 ve P50-12M numuneleri için %26,17 olarak bulunmuştur, (Şekil 3. 16b). Bu arada P0-16M numuneleri için eğilme dayanımındaki azalma %37,90 iken, P50-16M numuneleri için ise %35,06 olarak bulunmuştur, (Şekil 3.16c).

Tablo 3.13. Geopolimer harç numunelerinin %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat sonrası eğilme dayanımları

Molarite	Numune	Kontrol (MPa)	H ₂ SO ₄ (MPa)	H ₂ SO ₄ sonrası eğilme dayanımı değişimi (%)	MgSO ₄ (MPa)	MgSO ₄ sonrası eğilme dayanımı değişimi (%)
8M	P0-8M	9.13	6.04	33.86	7.80	14.61
	P10-8M	8.7	5.83	33.02	7.44	14.49
	P20-8M	8.51	5.74	32.51	7.32	14.02
	P30-8M	8.21	5.59	31.93	7.09	13.57
	P40-8M	8.9	6.08	31.69	7.71	13.31
	P50-8M	8.06	5.54	31.24	6.99	13.19
12M	P0-12M	9.21	6.56	28.75	8.09	12.14
	P10-12M	8.79	6.27	28.26	7.77	11.63
	P20-12M	8.59	6.17	28.17	7.62	11.25
	P30-12M	8.26	5.96	27.84	7.38	10.71
	P40-12M	8.16	5.95	27.09	7.31	10.36
	P50-12M	8.1	5.98	26.17	7.28	10.13
16M	P0-16M	9.4	5.84	37.90	7.79	17.09
	P10-16M	8.84	5.59	36.78	7.35	16.91
	P20-16M	8.63	5.51	36.11	7.18	16.78
	P30-16M	8.3	5.32	35.90	6.93	16.53
	P40-16M	8.21	5.28	35.63	6.87	16.32
	P50-16M	8.16	5.3	35.06	6.85	16.08

Geopolimer numunelerde 56 gün boyunca %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında ise P0-8M, P0-12M ve P0-16M numunelerindeki eğilme dayanım kayıpları sırasıyla %14,61, %12,14 ve %17,09 olarak elde edilmiştir. Geopolimer numunelere her %10 oranında bazaltik pomza katılması, %5 magnezyum sülfat sonrası artık (kalan) eğilme dayanım sonuçlarını bir miktar artırmıştır ve en yüksek artık eğilme dayanımları %50 pomza tozu ikameli geopolimer harç numunelerde elde edilmiştir. %5 magnezyum sülfat sonrası eğilme dayanımındaki azalmalar P50-8M, P50-12M ve P50-16M geopolimer numuneleri için sırasıyla %13,19, %10,13 ve %16,08 olmuştur. Sonuçlar, geopolimer numunelerde artık eğilme dayanımının artan bazaltik pomza ikamesi oranıyla az da olsa arttığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca 56 gün sonunda %5 sülfürik asit saldırısı geopolimer numunelerin eğilme dayanımını yaklaşık %32'ye kadar düşürürken, 56 gün boyunca %5 magnezyum sülfat saldırısı geopolimer numunelerin eğilme dayanımını yaklaşık %14'e kadar düşürmüştür. Bu sonuçlara ek olarak, en iyi sülfürik asit ve magnezyum sülfat dirençleri 12M konsantrasyona sahip geopolimer numunelerde elde edilirken, en düşük asit ve sülfat performansları ise 16M konsantrasyona sahip geopolimer numunelerde elde edilmiştir, Şekil 3. 15.



Şekil 3.16. 56 gün boyunca sülfürik asit ve magnezyum sülfat etkilerine maruz kalmış geopolimer numunelerde eğilme dayanımlarının değişimi %

3.4.5. Kimyasal Durabilite Sonrası Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Tablo 3.14’de ve Şekil 3.17’de 56 gün boyunca %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat etkisine maruz kalan pomza katkılı geopolimer harç numunelerin

ultrases geçiş hızı (UPV) sonuçları ve farklı NaOH konsantrasyonu etkisinde UPV değerlerindeki değişimler verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına paralel olarak %5 sülfürik asit etkisi dolayısıyla UPV değerlerindeki düşüş, %5 magnezyum sülfat etkisi dolayısıyla UPV değerlerindeki düşüşten daha fazladır. Kontrol 8M geopolimer numuneleri için UPV değerleri 5110 m/s ile 4290 m/s arasında değişirken, bu değerler %5 sülfürik asit etkisi sonrası 3790 m/s ile 3261 m/s arasında, %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında ise 4249 m/s ile 3648 m/s arasında değişmektedir. Referans 12M geopolimer numuneleri için UPV değerleri 5319 m/s ile 4450 m/s arasında değişirken, bu değerler %5 sülfürik asit etkisi sonrası 4116 m/s ile 3515 m/s arasında, %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında ise 4249 m/s ile 3648 m/s arasında değişmektedir. Benzer şekilde kontrol 16M geopolimer numuneleri için UPV değerleri 5650 m/s ile 4540 m/s arasında değişirken, bu değerler %5 sülfürik asit etkisi sonrası 4026 m/s ile 3321 m/s arasında, %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında ise 4559 m/s ile 3719 m/s arasında değişmektedir.

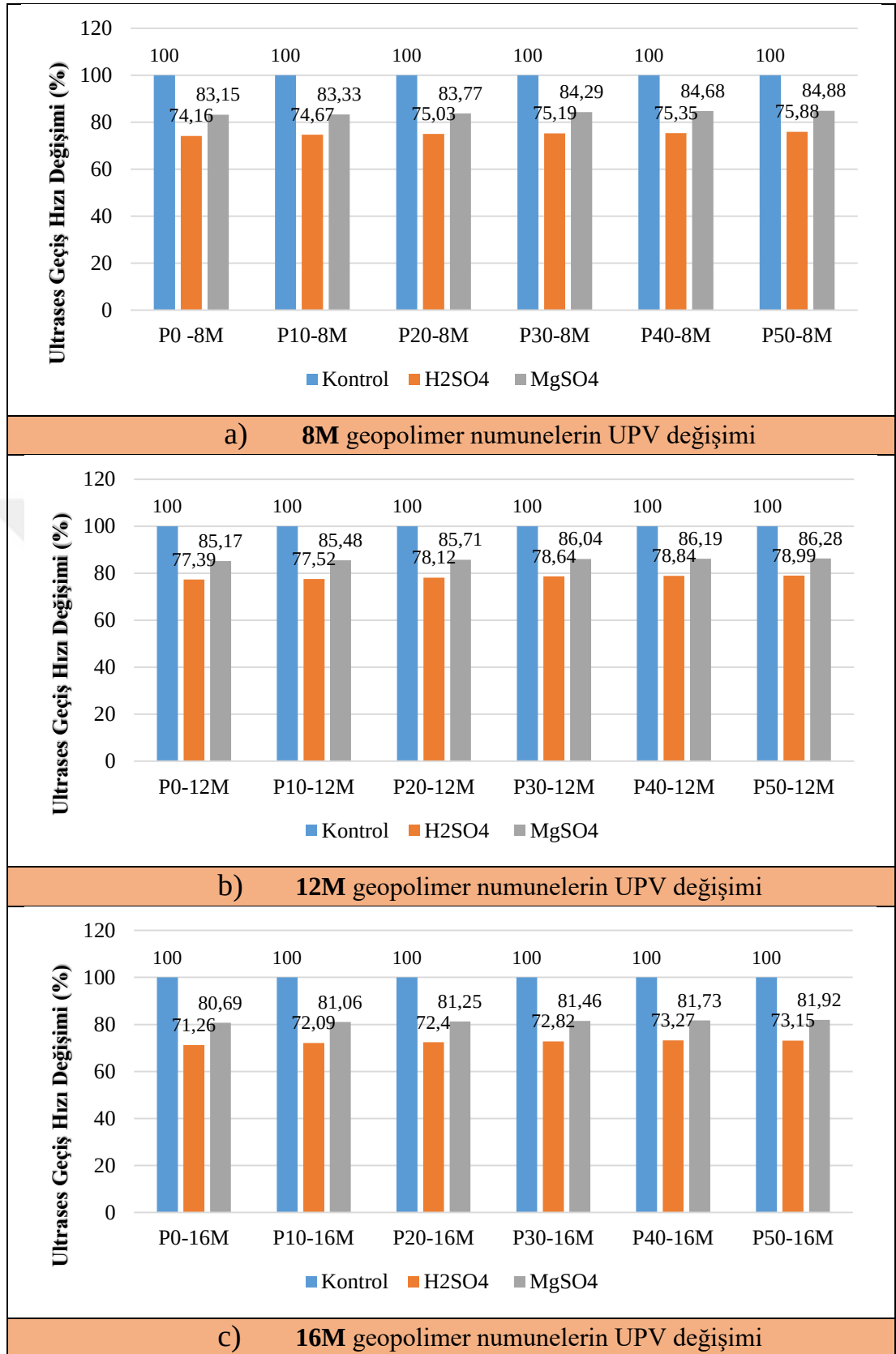
Şekil 3.17’de gösterilen sonuçlar incelendiğinde, %5 sülfürik asit etkisi sonrasında %10 oranında pomza eklenmesi UPV değerlerindeki düşüşü azaltmış olup, asit etkisi sonrasında en az UPV değeri azalması %50 bazaltik pomza katkılı geopolimer numunelerde olmuştur. %5 sülfürik asit etkisi sonrası P0-8M, P10-8M, P20-8M, P30-8M, P40-8M ve P50-8M geopolimer numunelerindeki UPV azalmaları sırasıyla 25.84%, 25.33%, 24.97%, 24.81%, 24.65% ve %24.12 olarak bulunmuştur. 12M NaOH konsantrasyonuna sahip numunelerde ise %5 sülfürik asit tesiri sonucunda P0-12M, P10-12M, P20-12M, P30-12M, P40-12M ve P50-12M geopolimer numunelerindeki UPV azalmaları sırasıyla %22.61, %22.48, %21.88, %21.36, %21.16 ve %21.01 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde %5 sülfürik asit etkisi sonrasında P0-16M, P10-16M, P20-16M, P30-16M, P40-16M ve P50-16M geopolimer numunelerindeki UPV düşüşleri sırasıyla %28.74, %27.91, %27.60, %27.18, %26.73, %26.85 olarak elde edilmiştir. Geopolimer numunelerin NaOH molariteleri değerlendirildiğinde %5 sülfürik asit sonrası en yüksek UPV değerleri 12M sodyum hidroksit molaritesine sahip geopolimer numunelerde elde edilirken, en düşük UPV değerleri ise 16M sodyum hidroksit molaritesine sahip geopolimer numunelerde elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin %5 magnezyum sülfat ortamında UPV değerleri incelendiğinde ise, pomza oranının artmasıyla magnezyum sülfat etkisi sonucunda

UPV düşüşü azalmıştır. En çok UPV düşüşü pomzasız geopolimer numunelerde elde edilirken, en az UPV düşüşü ise %50 bazaltik pomza katkılı geopolimer numunelerde elde edilmiştir. %5 magnezyum sülfat etkisi sonrası P0-8M, P10-8M, P20-8M, P30-8M, P40-8M ve P50-8M geopolimer numunelerindeki UPV azalmaları sırasıyla 16.85%, 16.67%, 16.23%, 15.71%, 15.32% ve %15.12 olarak bulunmuştur. 12M NaOH konsantrasyonuna sahip numunelerde ise %5 magnezyum sülfat etkisi sonucunda P0-12M, P10-12M, P20-12M, P30-12M, P40-12M ve P50-12M geopolimer numunelerindeki UPV azalmaları sırasıyla %14.83, %14.52, %14.29, %13.96, %13.81 ve %13.72 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde %5 magnezyum sülfat etkisi sonrasında P0-16M, P10-16M, P20-16M, P30-16M, P40-16M ve P50-16M geopolimer numunelerindeki UPV düşüşleri sırasıyla %19.31, %18.94, %18.75, %18.54, %18.27 ve %18.08 olarak elde edilmiştir. Geopolimer numunelerin NaOH molariteleri değerlendirildiğinde %5 magnezyum sülfat sonrası en yüksek UPV değerleri 12M sodyum hidroksit molaritesine sahip geopolimer numunelerde elde edilirken, en düşük UPV değerleri ise 16M sodyum hidroksit molaritesine sahip geopolimer numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 3.14. Geopolimer harc numunelerinin %5 sülfürik asit ve %5 magnezyum sülfat sonrası ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri

Molarite	Numune	Kontrol (m/s)	H2SO4 (m/s)	H2SO4 sonrası UPV değişimi (%)	MgSO4 (m/s)	MgSO4 sonrası UPV değişimi (%)
8M	P0-8M	5110	3790	25.84	4249	16.85
	P10-8M	4672	3489	25.33	3893	16.67
	P20-8M	4535	3402	24.97	3799	16.23
	P30-8M	4491	3377	24.81	3785	15.71
	P40-8M	4493	3385	24.65	3804	15.32
	P50-8M	4298	3261	24.12	3648	15.12
12M	P0-12M	5319	4116	22.61	4249	14.83
	P10-12M	5018	3890	22.48	3893	14.52
	P20-12M	4620	3618	21.88	3799	14.29
	P30-12M	4525	3558	21.36	3785	13.96
	P40-12M	4613	3636	21.16	3804	13.81
	P50-12M	4450	3515	21.01	3648	13.72
16M	P0-16M	5650	4026	28.74	4559	19.31
	P10-16M	5146	3709	27.91	4171	18.94
	P20-16M	4939	3576	27.60	4012	18.75
	P30-16M	4656	3390	27.18	3793	18.54
	P40-16M	4756	3511	26.73	3887	18.27
	P50-16M	4540	3321	26.85	3719	18.08



Şekil 3.17. 56 gün boyunca sülfürik asit ve magnezyum sülfat etkilerine maruz kalmış geopolimer numunelerde UPV değerlerinin değışimi %

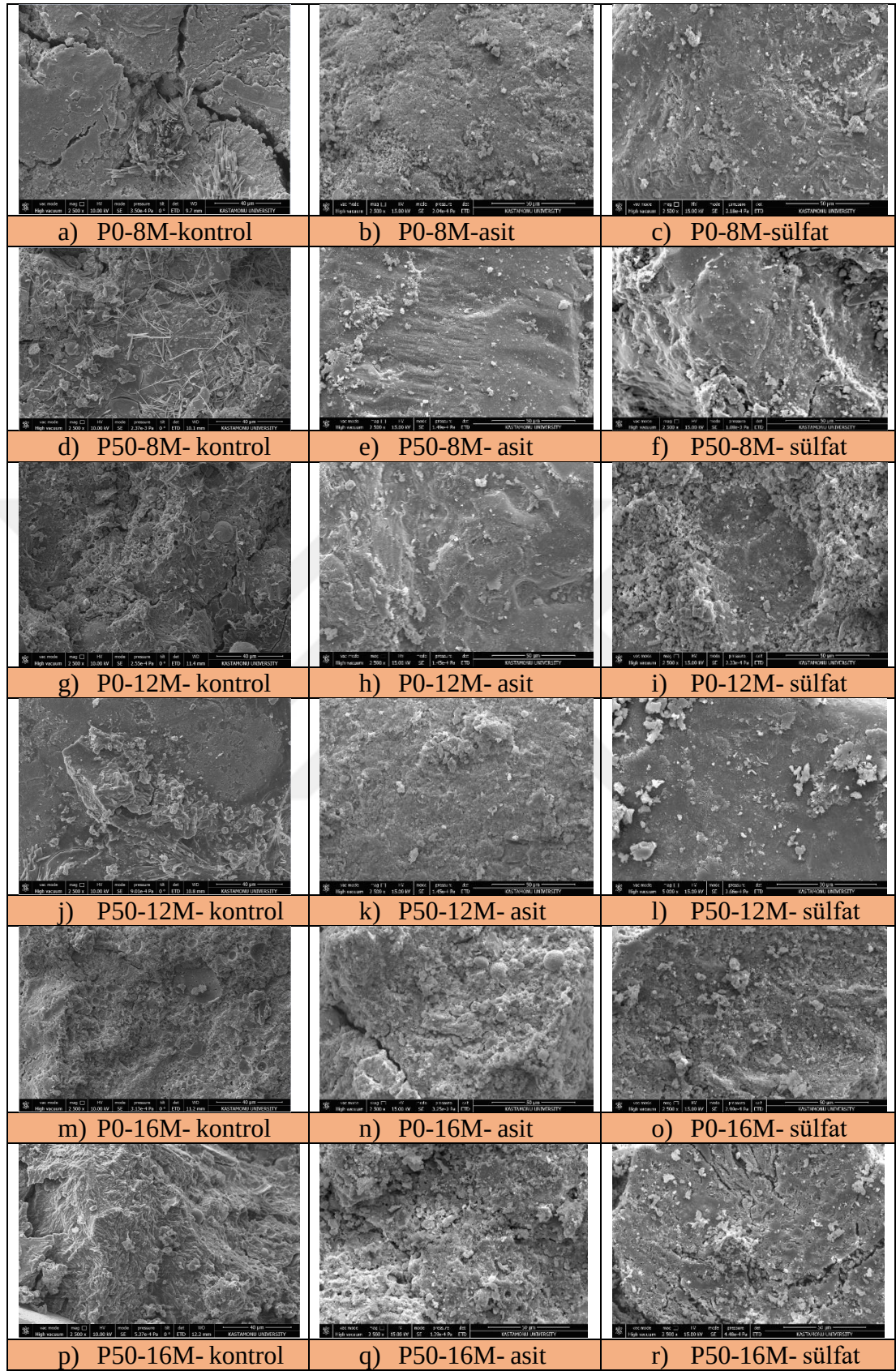
3.4.6. Kimyasal Durabilite Sonrası SEM ve EDS Sonuçları

%5 magnezyum sülfat (sağ), %5 sülfürik asit (orta) ve kontrol (sol) ortamlarında Jeopolimer numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografları Şekil 3.18'de gösterilmektedir. Jeopolimerik jelleri, gözenekleri, mikro çatlakları ve reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş alümino-silikat partikülleri SEM görüntüleri aracılığıyla gösterildi. Kontrol ortamındaki Jeopolimer numunelerin SEM mikrografları incelendiğinde, 8M'den (Şekil 3.18a), 12M'ye (Şekil 3.18g) ve 16M'ye (Şekil 3.18m) kadar NaOH konsantrasyonlarının çatlak yoğunluğunu önemli ölçüde azalttığını gördük. Ek olarak, NaOH konsantrasyonları arttıkça, gözenekler, boşluklar, reaksiyona girmemiş partiküller ve iğne tipi jeopolimer ürünleri azalmıştır. NaOH molaritesinin 8M'den 12M'ye ve 16M'ye yükseltilmesi, uçucu kül ve cüruf tanelerinin daha fazla aktive olmasına neden oldu. Bunun sonucunda daha fazla C-S-H ve N-A-S-H jel ürünü oluştu. Kontrol ortamındaki 16M AAM örneklerinde yoğun bir mikro yapı bulundu. Ek olarak, kontrol ortamındaki %50 pomza eklenmiş Jeopolimer numunelerinin SEM görüntüleri, reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş BPP tanelerinin ve çatlak yoğunluklarının NaOH konsantrasyonlarının artmasıyla azaldığını göstermiştir. 8M'den 12M'ye (Şekil 3.18j) ve 16M'ye (Şekil 3.18p). Ek olarak, sodyum kristallerinin çoğu jeopolimerizasyon reaksiyonları sırasında daha yüksek NaOH konsantrasyonları için tüketilmiştir. BPP eklenmiş örneklerin SEM görüntüleri, daha zayıf, homojen olmayan ve gözenekli mikro yapıların, azaltılmış mekanik dayanıkların bir sonucu olarak daha fazla çatlak içerdiğini göstermiştir. Pomza partiküllerinin boşluklara ve zayıf arayüzlere neden olduğu, daha önce yapılan bir araştırmaya göre daha düşük dayanıma neden olduğu gösterilmiştir (Safari, Zrar, Kurda, Rawaz, Al-Hadad, Botan, Mahmood, Faraydon, & Tapan, Mucip, 2020). Bu arada, SEM görüntüleri mikro çatlaklara neden olabilir. Bu çatlaklar, jeopolimerik jel oluşumu sırasında meydana gelen büzülme çatlaklarından kaynaklanabilir (Alehyen, S., Achouri, M. E. L., & Taibi, M., 2017).

Asit ve sülfata maruz kalan numunelerin SEM mikrografları incelendiğinde, jeopolimer numuneler yüzeylerinde ve arayüzey geçiş bölgelerinde beyaz tortular veya sülfatlar görülür. Ettringit ve alçı oluşumları, çatlaklar, genleşmeler, dökülmeler ve mukavemet kaybı gibi sorunlara neden olabilir (Bassuoni, MT & Nehdi, ML, 2007) (Karthik, A, Sudalaimani, K, & Vijayakumar, CT, 2017). SEM görüntüleri, numune yüzeylerinde ve ITZ bölgelerinde sülfat (ettringit) oranının çok daha yüksek olduğunu

göstermiştir. Bu, sülfürik asidin jeopolimer numuneler için en tehlikeli ortam olduğunu göstermektedir. Kimyasal maruziyetten sonra, Şekil 3.18.n, 3.18.o, 3.18.q ve 3.18.r'de görülebileceği gibi, daha büyük mikro çatlaklara ve daha fazla beyaz tortu (alçı ve ettringit) oluşumuna sahip 16M NaOH konsantrasyonlarına sahip jeopolimer numunelerde en zayıf mikro yapı elde edildi. Ayrıca SEM mikrografları, düzensiz şekilli cüruf tanelerini ve reaksiyona girmemiş küresel uçucu kül partiküllerini göstermiştir. Bu, zayıf bir mikro yapının göstergeleridir. Kimyasal maruziyetten sonra 16M örneklerinde reaksiyona girmemiş cüruf ve uçucu kül partikülleri daha fazla bulunmuştur.

Bununla birlikte, Şekil 3.18.h, 3.18.i, 3.18.k ve 3.18.l, kimyasal maruziyetlerden sonra düşük miktarda reaksiyona girmemiş partikül içeren yoğun bir mikro yapıya sahip 12M örnekleri göstermektedir. 8M örnekler için Şekil 3.18.b, 3.18.c, 3.18.e ve 3.18.f, asit ve sülfat maruziyetinden kaynaklanan aşınmış yüzeyleri göstermektedir. 8M örneklerinde daha az C-S-H ve N-A-S-H jeli oluşumu, jeopolimer numuneler yapısında zayıf bağlara neden olabilir. Bu nedenle, yüzeyin bozulması (erozyon oluşumu) daha kolaydır. Daha önceki çalışmalarda, düşük alkali aktivatör molaritesi, düşük kürleme sıcaklığı ve düşük pomza reaktivitesi, jeopolimer numunelerde zayıf bağların oluşumuna neden olabilir (Kantarıcı, F, Türkmen, I, & Ekinci, E, 2019). Bununla birlikte, pomzanin %50'sini içeren örnekler, pomzanin %50'sini içermeyen numunelere göre daha yoğun bir mikro yapı göstermiştir. Pomza içermeyen numunelerdeki düşük Ca/Si oranı buna neden olabilir. Bu, Pomzanin cüruf partiküllerinden daha düşük CaO içeriğine sahip olmasıdır. Ca/Si oranı yüksek jel sistemleri, sülfürik asit saldırısına karşı daha az direnç göstermiştir (Aiken, T. A, Kwasny, J, Sha, W, & Soutsos, M. N, 2018) (Mehta, Ankur & Siddique, Rafat, 2017). Sonuç olarak, daha düşük CaO içeren jeopolimer numunelerde kalsiyum sülfat oluşumu ve bozulma azalır. Ayrıca, Pomzanin gözenekli mikro yapısı, agresif iyonların örneklerin çekirdeğine girmesini engeller; bu nedenle, bu pomza içeren jeopolimer numunelerde ettringit ve alçı oluşumu daha düşüktür. 16M NaOH konsantrasyonuna sahip jeopolimer numuneler kontrol ortamlarında en iyi performans göstermesine rağmen, asit ve sülfat ortamlarında en kötü performans göstermişlerdir. Bu, yüksek sülfürik asit seviyelerinde güçlü alümino-silikat ağlarının depolimerleşmesine bağlanabilir (Mehta, Ankur & Siddique, Rafat, 2017).



Şekil 3.18. Kimyasal Durabilite Sonrası geopolimer numunelerin SEM mikrografları

Tablo 3.15, pomza içermeyen jeopolimer numunelerinin ve Tablo 3.16, %50 pomza içeren jeopolimer numunelerinin Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) sonuçlarını göstermektedir. Jeopolimer numunelerinin tipik atom oranları, C-S-H ve N-A-S-H jellerinin yüksek Ca, Si, Na ve Al atom oranlarıyla karakterize edildi. Pomza içermeyen AAM örnekleri için Al/Si, Ca/Si ve Na/Al atom oranları 8M'de 0.34, 1.29 ve 2.82 olarak bulundu; 12M'de 0.46, 0.95 ve 1.59 olarak bulundu; ve 16M'de 0.57, 0.74 ve 0.55 olarak bulundu. %50 pomza eklendiğinde, 8M'de Al/Si, Ca/Si ve Na/Al atom oranları sırasıyla 0.15, 1.31 ve 4.97 oldu; 12M'de 0.21, 1.30 ve 3.39 oldu ve 16M'de 0.29, 0.81 ve 2.18 oldu. Pomzanın %50 ilavesi, Na/Si ve Ca/Si atom oranlarını azaltırken, Na/Al atom oranlarını artırdı. Bu, pomza ilavesi ile Si ve Na içeriği artar ve Ca içeriği azalır. NaOH molaritesi, yeni jel bağlayıcılarının atom oranlarını da etkiledi. NaOH molaritesi arttıkça Ca/Si ve Na/Al atom oranları azalırken, Al/Si atom oranı arttı. Daha önceki bir çalışmada (Jia, Shanshan & Richardson, Ian G, 2018), Ca/Si atom oranındaki bir azalmanın, C-A-S-H jellerindeki silikat zincirini uzatabileceği ve güçlendirebileceği gösterilmiştir. Bu, daha yüksek mukavemeti sağlar. Düşük Ca/Si atom oranı, daha uzun zincir oluşumunu teşvik eder ve bu da sürekliliği ve bağlantıyı artırır (Wang, J., ve diğerleri, 2022) (Zhu, Xiaohong & Richardson, Ian G, 2023). Ek olarak, Ca/Si oranı yaklaşık 0.75 olduğunda kalsiyum reaksiyonu çok hızlıdır ve daha yüksek basınç dayanımları sağlar (Si, Ruizhe, Guo, Shuaicheng, & Dai, Qingli, 2019).

Tablo 3.15. Kimyasal Durabilite Sonrası Pomza İçermeyen Geopolimer Numunelerin EDS Sonuçları

Elem.	P0-8M Kontrol	P0-8M Asit	P0-8M Sülfat	P0-12M Kontrol	P0-12M Asit	P0-12M Sülfat	P0-16M Kontrol	P0-16M Asit	P0-16M Sülfat
	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %
C	14,89	5,55	0,09	17,52	0,14	3,56	14,40	0,31	0,12
O	47,59	54,55	49,69	51,22	42,35	55,82	52,14	60,54	53,40
Na	7,79	0	1,87	5,97	0,20	1,11	3,34	0	2,95
Mg	0,56	0,44	0,18	0,60	0,93	0,60	0,51	0,97	0,43
Al	2,76	1,16	4,64	3,76	4,19	2,76	6,12	4,30	3,18
Si	8,08	14,81	11,73	8,19	13,50	8,87	10,73	10,27	8,32
S	5,62	10,74	14,65	3,54	20,14	16,78	3,14	9,56	16,99
K	0,45	0,29	0,48	0,30	0,54	0,34	0,36	0,39	0,42
Ca	10,42	11,21	13,82	7,80	14,28	7,62	7,97	12,07	11,87
Ti	0,38	0,29	0,70	0,32	0,88	0,32	0,35	0,40	0,40
Pm	0,37	0,27	0,74	0,20	0,76	0,32	0,23	0,28	0,55
Mn	0,19	0,23	0,26	0,13	0,65	0,24	0,12	0,12	0,44
Fe	0,91	0,47	1,15	0,45	1,46	1,69	0,61	0,83	0,97
Al/Si	0,34	0,08	0,40	0,46	0,31	0,32	0,57	0,42	0,38
Ca/Si	1,29	0,76	1,18	0,95	1,06	0,86	0,74	1,17	1,43
Na/Al	2,82	0,00	0,40	1,59	0,05	0,40	0,55	0,00	0,93

SEM/EDS sonuçları, %5 magnezyum sülfat ve %5 sülfürik asit maruziyetinden sonra atom oranlarının önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Kimyasal saldırıdan sonra kükürt içeriği %3-5'ten %24.87'ye kadar önemli ölçüde artmıştır. 16M AAM örnekleri, sülfürik asit saldırısı altında en yüksek kükürt içeriğine sahiptir (%24.87). Kimyasal saldırılar, Al/Si, Ca/Si ve Na/Al atom oranlarını azalttı. Kimyasal saldırılar devam ettikçe, C-A-S-H jelinin kireçlenmesi Ca/Si oranında bir azalmaya neden olur. Daha önceki araştırmalar, kimyasal saldırının kireçlenmeyi neden olabileceğini göstermiştir (Allahverdi, Ali & Skvara, Frantisek, Sulfuric Acid Attack On Hardened Paste of Geopolymer Cements-Part 1. Mechanism of Corrosion at Relatively High Concentrations, 2005). Ek olarak, bulgular, kimyasal saldırılardan sonra Al/Si atom oranının azaldığını göstermiştir. Bu azalma, sülfat saldırısından daha fazla olduğu için asit saldırısından daha fazladır. Si-O-Si ağı üzerindeki proton saldırısının bir sonucu olarak jel yapılarından alüminyum sızması, kimyasal saldırılardan kaynaklanan Al/Si atom oranındaki bu azalmaya neden olabilir (Allahverdi, Ali & Skvara, Frantisek, Nitric Acid Attack on Hardened Paste of Geopolymeric Cements, Part 1, 2001). EDS sonuçları incelendiğinde, kireçlenme etkisi pomza içeren ve içermeyen örneklerde belirgin değildir. Sonuçlarla karşılaştırıldığında, 16M pomza eklenmiş jeopolimer numunelerinde Ca/Si oranı 0,13 olarak elde edilirken ve 12M pomza eklenmiş jeopolimer numunelerinde Ca/Si oranı 0.68 olarak bulunmuştur. Bu bulgular, 12M örneklerinde en yüksek ve 16M örneklerinde en düşük mukavemetin bulunduğu mekanik mukavemet bulgularıyla paraleldir.

Tablo 3.16. Kimyasal Durabilite Sonrası %50 Pomza İçeren Geopolimer Numunelerin EDS Sonuçları

Elem.	P50-8M Kontrol	P50-8M Asit	P50-8M Sülfat	P50-12M Kontrol	P50-12M Asit	P50-12M Sülfat	P50-16M Kontrol	P50-16M Asit	P50-16M Sülfat
	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %	Atomik %
C	20,37	18,94	3,62	26,18	11,48	6,64	30,18	15,45	12,88
O	49,69	44,04	42,73	47,22	34,93	59,48	43,18	30,07	49,33
Na	5,77	0,00	4,37	5,12	0,01	0,89	5,25	2,61	2,96
Mg	0,32	0,33	0,73	0,30	0,16	0,36	0,59	0,18	0,29
Al	1,16	1,80	4,07	1,51	0,82	3,21	2,41	3,58	2,51
Si	7,98	17,17	16,98	7,29	15,91	10,04	8,34	18,70	18,79
S	3,37	13,20	14,98	1,99	24,10	9,01	2,03	24,87	8,98
K	0,14	0,32	0,96	0,22	0,31	0,43	0,29	0,32	0,35
Ca	10,49	3,16	8,44	9,47	10,87	8,73	6,72	2,52	2,68
Ti	0,14	0,23	0,63	0,16	0,36	0,34	0,24	0,44	0,24
Pm	0,14	0,21	0,53	0,15	0,37	0,23	0,23	0,48	0,19
Mn	0,11	0,10	0,33	0,12	0,30	0,18	0,11	0,34	0,19
Fe	0,31	0,53	1,66	0,26	0,41	0,46	0,45	0,47	0,58
Al/Si	0,15	0,10	0,24	0,21	0,05	0,32	0,29	0,19	0,13
Ca/Si	1,31	0,18	0,50	1,30	0,68	0,87	0,81	0,13	0,15
Na/Al	4,97	0,00	1,07	3,39	0,01	0,28	2,18	0,73	1,18

SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı bazaltik pomza tozu oranlarının (%0, %10, %20, %30, %40 ve %50) ve NaOH konsantrasyonlarının (8M, 12M ve 16M) cüruf/uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik dayanımı, yüksek sıcaklık direnci ve farklı kimyasal dayanıklılıkları (%5 magnezyum sülfat ve %5 sülfürik asit) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi gösterilmektedir;

- ✓ Geopolimer numunelerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı, devam eden geopolimerizasyon reaksiyonları nedeniyle 48 saat boyunca 65°C'de başlangıç ısı kürüne rağmen zamanla arttığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Bazaltik pomza tozu eklenmesi, CaO içeriğinin eksikliğinden dolayı hem basınç dayanımını hem de eğilme dayanımını azaltmıştır. En düşük basınç dayanımı, en yüksek pomza tozu eklemelerine (50%) sahip geopolimer numunelerde elde edilmiştir. Ancak, bu basınç dayanım farkı, pomza parçacıklarının daha yavaş çözünmesi nedeniyle zamanla azalmıştır. Örneğin, pomzasız ve %50 pomza içeren geopolimer numuneler arasında ortalama basınç dayanımı farkı 7 günde %39, 28 günde %31 ve 56 günde %24 olarak bulunmuştur. Benzer ancak daha düşük bir basınç dayanım farkı, pomza eklenmiş diğer geopolimer numunelerde de elde edilmiş olup, bu durum pomza eklenmiş geopolimer numunelerde daha yüksek mekanik dayanım için uzun bir kürlenme süresinin gerekli olduğunu göstermektedir.
- ✓ NaOH molaritesindeki artış, pomza ilavesinden bağımsız olarak, geopolimer numunelerin hem basınç dayanımını hem de eğilme dayanımını iyileştirmiştir. 16M geopolimer numuneler en yüksek dayanımı gösterirken, 8M numuneler en düşük dayanımı sergilemiştir. Bunun nedeni, NaOH çözeltisinden gelen ilave sodyumun C-(N)-A-S-H jellerinin oluşumuna yol açması ve bunun sonucunda daha yoğun bir mikro yapı ve daha yüksek mekanik dayanım elde edilmesidir. En yüksek basınç dayanımı değerleri 7, 28 ve 56 günlerde sırasıyla 39.9, 51.90 ve 61.62 MPa (16M-pomzasız) iken, en düşük basınç dayanımı değerleri 20.4, 31.36 ve 41.19 MPa (8M-%50 pomza) olarak ölçülmüştür.
- ✓ UPV değerleri 7. günde 2919 m/s ile 4211 m/s arasında, 28. günde 3647 m/s ile 5007 m/s arasında ve 56. günde 4298 m/s ile 5650 m/s arasında değişmiştir. UPV sonuçları, en yüksek UPV değerlerinin 16M içeren geopolimer numunelerde, en

düşük değerlerin ise 8M içeren geopolimer numunelerde elde edildiği basınç dayanımının ve eğilme dayanımının bulgularını doğrulamıştır. Yoğun mikro yapı, dalga yayılımında gecikmeye neden olmuştur.

- ✓ 200°C'de, geopolimer numunelerin basınç dayanımı, devam eden geopolimerizasyon reaksiyonları nedeniyle hafifçe iyileşmiştir; bu durum, içsel otoklavlama işlemine ve boşlukların daha fazla C-S-H ve N-A-S-H jelleri ile doldurulmasına bağlanabilir ve bu da daha yoğun bir mikro yapı sonuçlanabilir. Öte yandan, geopolimer numunelerin eğilme dayanımı 200°C'de hafifçe azalmıştır; bunun nedeni, eğilme dayanımının mikro yapısal kusurlara, çoklu çatlak oluşumuna ve yayılmasına ve gözenekli mikro yapının evrimine daha duyarlı olması olabilir.
- ✓ 400°C'de, geopolimer numunelerin basınç dayanımı, mikro çatlak gelişimi, geopolimerlerde faz değişimi geçişi ve farklı termal genleşme nedeniyle hafifçe azalmıştır. 400°C'de ortalama basınç dayanımı kayıpları 7 günde %16.85, 28 günde %15.03 ve 56 günde %12.72 olarak gerçekleşmiştir. Bu arada, ortalama eğilme dayanımı azalmaları 400°C'de 7 günde %64.54, 28 günde %36.40 ve 56 günde %30.70 olarak kaydedilmiştir.
- ✓ 600°C'de, geopolimer numunelerin basınç dayanımı orta derecede azalmıştır ve bu durum, 600°C'deki serbest suyun buharlaşmasına, matris dehidratasyonuna ve termal reaksiyon mekanizmasına bağlanabilir. Basınç dayanımı kayıpları 7 günde %41.88, 28 günde %34.57 ve 56 günde %27.29 olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, 600°C'ye maruz kalma nedeniyle ortalama eğilme dayanımı azalmaları 7 günde %77.02, 28 günde %62.48 ve 56 günde %54.93 olarak kaydedilmiştir.
- ✓ NaOH molaritesi hem basınç dayanımını hem de eğilme dayanımını iyileştirmesine rağmen, yüksek sıcaklıklarda NaOH molaritesinden bağımsız olarak geopolimer numunelerde benzer mekanik dayanım azalmaları elde edilmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanım kayıpları üzerinde NaOH konsantrasyonunun hiçbir etkisinin olmadığını veya ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir; bu nedenle, 8M NaOH molaritesi, ekonomik geopolimer beton üretimi için faydalı olabilir.

- ✓ %30 pomza katılımlarına kadar daha düşük veya benzer mekanik dayanım kayıpları elde edilmiştir; bundan sonra, kayıplar %40 ve %50 pomza katılımları için daha yüksek hale gelmiştir. Yüksek sıcaklık direnci için, cüruf/uçucu kül esaslı geopolimer numunelerde %30 pomza tozu kullanımı faydalıdır.
- ✓ SEM sonuçları, yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında mekanik dayanım sonuçlarını doğrulamaktadır. Reaksiyona girmemiş taneler, gözenekler, boşluklar ve iğne tipi geopolimer ürünleri, daha yüksek NaOH molariteleri ile azalmıştır. Daha yüksek NaOH molaritesine sahip geopolimer numunelerde yoğun bir mikro yapı elde edilmiştir. Pomza eklenmiş geopolimer numunelerin SEM mikrografları, daha fazla sayıda çatlak sayısına sahip homojen olmayan ve gözenekli bir mikro yapının elde edildiğini ortaya koymuştur. Çatlak yoğunluğu ve reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş pomza tanelerinin sayısı, daha yüksek NaOH molaritesi ile azalmıştır. 600°C'de, SEM mikrograflarında oval boşluklar, geopolimer matrisinin kısmi erimesi ve küresel gözenek oluşumu gözlemlenmiş ve bu durum geopolimer numunelerin mekanik dayanımlarını azaltmıştır.
- ✓ EDS sonuçları, geopolimer numunelerin basınç dayanımının Si/Na atomik oranındaki artışla birlikte arttığını, Ca/Si, Si/Al ve Na/Al atomik oranlarındaki artışla ise azaldığını göstermiştir. 600°C'de, pomzasız geopolimer numunelerde Ca/Si oranı artarken, %50 pomza içeren geopolimer numunelerde azalmıştır. Bu durum, pomza bazlı matrisin kısmen eriyerek daha önce geopolimerleşme ürünleriyle doldurulmamış bazı gözenekleri onarmasına bağlanabilir.
- ✓ Pomza ikamesi hem %5 sülfürik asite hem de %5 magnezyum sülfata karşı iyi bir durabilite performansı göstermiş olup, kimyasal etki dolayısıyla en az dayanım düşüşü %50 pomza ikameli geopolimer numunelerde elde edilmiştir.
- ✓ NaOH molaritesinin kimyasal performansı irdelendiğinde, hem %5 sülfürik asit hem de %5 magnezyum sülfat etkisi dayanım kaybı en az 12M geopolimer numunelerde elde edilirken, en yüksek dayanım kayıpları ise 16M geopolimer numunelerde elde edilmiştir. 8M geopolimer numuneler ise 12M'dan fazla 16M'lardan daha az dayanım kaybı göstermiştir. Kimyasal durabilite etkisi için en iyi NaOH molaritesi 12M bulunmuştur. Dayanım sonuçlarına ek olarak, UPV sonuçlarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

- ✓ SEM analizleri, kontrol ortamında NaOH konsantrasyonunun artmasıyla (8M'den 16M'ye) çatlak yoğunluğunun azaldığını ve daha yüksek NaOH molaritelerinde (12M ve 16M) daha yoğun bir mikro yapı elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, iğne tipi jeopolimer ürünler, gözenekler, boşluklar ve reaksiyona girmemiş tanelerin de azaldığı gözlemlenmiştir. %50 pomza ilavesi ile de çatlak yoğunluğunun yüksek NaOH konsantrasyonlarında azaldığı, ancak pomza ilavesinin daha gözenekli ve homojen olmayan bir mikro yapıya neden olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal etki sonrası mikroyapı incelendiğinde ise, yüzeyde ve ara geçiş bölgelerinde beyaz tortular (ettringit ve alçıtaşı) oluştuğu ve sülfürik asidin daha tehlikeli bir ortam olduğu belirlenmiştir. 16M NaOH'li jeopolimer numunelerde daha fazla mikro çatlak ve beyaz tortu oluşumu gözlemlenirken, 12M'lik numuneler daha yoğun bir mikro yapı göstermiştir. 8M jeopolimer numunelerde yüzeyde aşınma (erozyon) gözlemlenirken, 16M'lik numunelerde daha fazla reaksiyona girmemiş cüruf ve uçucu kül parçacıkları bulunmuştur.
- ✓ EDS analizleri, kimyasal saldırılardan sonra jeopolimer numunelerinin atomik oranlarında önemli değişikliklere neden olduğunu göstermiştir. Hem pomzalı hem de pomzasız numunelerde Al/Si, Ca/Si ve Na/Al oranlarında genel bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş, kimyasal saldırıların C-A-S-H jel yapısını bozması ve elementlerin sızmasına neden olmasıyla açıklanabilir. Pomzalı numunelerde ise dekalsifikasyon etkisi daha belirgin olarak ortaya çıkmış ve Ca/Si oranında önemli düşüşler görülmüştür. Bu durum, pomzanın gözenekli yapısının kimyasal saldırılara karşı daha hassas olmasından kaynaklanabilir. 12M numunelerin hem yüksek dayanım hem de daha iyi kimyasal direnç gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, 12M NaOH konsantrasyonunun optimum bir jeopolimerik jel yapısı oluşturarak hem mekanik dayanımı hem de kimyasal dayanıklılığı artırdığını göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Abed, M. H., Abbas, I. S., Hamed, M., & Canakci, H. (2022). Rheological, Fresh, and Mechanical Properties of Mechanochemically Activated Geopolymer Grout: A Comparative Study With Conventionally Activated Geopolymer Grout. *Construction and Building Materials*, 126338.
- Acer, Ş. (2018, Mayıs). Silis Dumani ve Öğütülmüş Pomzanin Yüksek Performanslı Beton Özellikleri Üzerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- Aiken, T. A., Kwasny, J., Sha, W., & Soutsos, M. N. (2018). Effect of Slag Content and Activator Dosage on the Resistance of Fly Ash Geopolymer Binders to Sulfuric Acid Attack. *Cement and Concrete Research*, 23-40.
- Akyildirim, S. (2021). Uçucu Kül Bazlı Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürü Etkisinin ve Yüksek Fırın Cürufu İkamesinin Dayanım ve Durabilite Özelliklerine Etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Al Bakri, A., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Ismail, Khairul Nizar, Rafiza, AR, & Zarina, Y. (2011). The Relationship of Naoh Molarity, Na₂sio₃/Naoh Ratio, Fly Ash/Alkaline Activator Ratio, And Curing Temperature to The Strength of Fly Ash-Based Geopolymer. *Advanced Materials Research*, 1475-1482.
- Al-Amoudi, O. (2003). Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed To Varying Concentrations of Sodium Sulfate. *Cement and Concrete Composites*, 429-437.
- Al-Antaki, T. S. (2020). Pomza Katkili Normal ve Hafif Betonların Kimyasal Durabilitesinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Albayrak, E. (2023). Kalsine Edilmiş Pozzolanın Geopolimer. *Yüksek Lisans Tezi*. Rize, Türkiye: Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi.
- Albitar, M., Ali, MS Mohamed, Visintin, P., & Drechsler, M. (2017). Durability Evaluation of Geopolymer and Conventional Concretes. *Construction and Building Materials*, 374-385.
- Al-Dulaijan, S., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M., Sharif, A., Shameem, M., & Ibrahim, M. (2003). Sulfate Resistance of Plain And Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfate. *Cement and Concrete Composites*, 429-437.
- Alehyen, S., Achouri, M. E. L., & Taibi, M. (2017). Characterization, Microstructure and Properties of Fly Ash-Based Geopolymer. *Mater. Environ. Sci*, 1783-1796.
- Aljanabi, M. A. (2021). Yüksek Sıcaklıklarda Genişletilmiş Kil İçeren Hafif Elyaf Takviyeli Geopolimer Harcinin Mekanik Performansı. *Yüksek Lisans Tezi*. Türkiye: Gaziantep Üniversitesi.

- Aljanabi, M., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Kadhim, S. (2022). Residual Mechanical Performance of Lightweight Fiber-Reinforced Geopolymer Mortar Composites Incorporating Expanded Clay After Elevated Temperatures. *Journal of Composite Materials*, 1737-1752.
- Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Kani, E. N. (2008). Investigating The Possibility of Utilizing Pumice-Type Natural Pozzonal in Production of Geopolymer Cement. *Ceramics Silikaty*, 15-16.
- Allahverdi, Ali, & Skvara, Frantisek. (2001). Nitric Acid Attack on Hardened Paste of Geopolymeric Cements, Part 1. *Ceramics Silikaty*, 81-88.
- Allahverdi, Ali, & Skvara, Frantisek. (2005). Sulfuric Acid Attack On Hardened Paste of Geopolymer Cements-Part 1. Mechanism of Corrosion at Relatively High Concentrations. *Ceramics Silikaty*, 225.
- Almalkawi, A. T., Hamadna, S., & Soroushian, P. (2017). One-Part Alkali Activated Cement Based Volcanic Pumice. *Construction and Building Materials*, 367-374.
- Alnkaa, A. A. (2019). Farklı Kür Koşullarının Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi. *Doktora Tezi*. Kastamonu: Kastamonu Üniversitesi.
- Altındal, I. (2020). Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Gelişim Üniversitesi.
- Ariffin, MAM, Bhutta, MAR, Hussin, MW, Tahir, M Mohd, & Aziah, Nor. (2013). Sulfuric Acid Resistance of Blended Ash Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 80-86.
- Arıöz, Ö. (2009). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. *107M344 No'lu Tübitak Projesi*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- Aruntaş, H. Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 193-203.
- Asrani, N. P., Murali, G., Parthiban, K., Surya, K., Prakash, A., Rathika, K., & Chandru, U. (2019). A Feasibility of Enhancing The Impact Resistance of Hybrid Fibrous Geopolymer Composites: Experiments and Modelling. *Construction and Building Materials*, 56-68.
- Assi, Lateef, Anay, Rafal, Leaphart, Davis, Soltangharai, Vafa, & Ziehl, Paul. (2018). Understanding Early Geopolymerization Process of Fly Ash-Based Geopolymer Paste Using Pattern Recognition. *J Mater Civ Eng*, 30, 04018092.
- Atabey, I. I. (2017). F Sinifi Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi.

- Aydın, S. (2010). Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi. *Doktora Tezi*. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cement And Concrete Research*, 1224-1232.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack. *Cement and Concrete Research*, 658-670.
- Bakri A., Kamarudin, M., BinHussain, H., Nizar M., Zarina I., & Rafiza Y. (2011). The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers. *Physics Procedia*, 286-291.
- Balçıkanlı, M., Özbay, E., & Türker, H.T. (2015). Alkalilerle Aktive Edilmiş Harçların Çekip Çıkarma Ve Aşınma Dirençlerinin Belirlenmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 87-98.
- Baradan, A. , Yazıcı, H., & Aydın, S. (2012). *Beton*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334.
- Barsoum, M. W., & Ganguly, A. (2006). Microstructural Evidence of Reconstituted Limestone Blocks in the Great Pyramids of Egypt. *Journal of the American Ceramics Society*, 89.
- Bassuoni, MT, & Nehdi, ML. (2007). Resistance of Self-Consolidating Concrete to Sulfuric Acid Attack with Consecutive Ph Reduction. *Cement and Concrete Research*, 1070-1084.
- Bilim, C. (2006). Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği. *Doktora Tezi*. Adana: Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bilim, C., Karahan, O., Atış, C.D., & Ilkentapar, S. (2013). Influence of Admixtures on The Properties of Alkali-Activated Slag Mortars Subjected to Different Curing Conditions. *Materials & Design*, 540-547.
- Bingöl, Ş., Bilim, C., Atış, C. D., & Durak, U. . (2020). Durability Properties of Geopolymer Mortars Containing Slag. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 561-569.
- Bondar, Dali, Lynsdale, CJ, Milestone, NB, & Hassani, N. (2015). Sulfate Resistance of Alkali Activated Pozzolans. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 145--158.
- Bonder, N. (2009). Alkali Activation of Iranian Natural Pozzolans for Producing Geopolymer Cement and Concrete. *Doctoral Theses*. Sheffield, UK: University of Sheffield, .
- Çelikten, S. (2014). Çelik fiber içeren yüksek dayanımlı beton özellikleri üzerine metakaolin ve öğütülmüş pomzanın etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde: Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri.

- Cembureau. (2015). *Activity Report*. Brussels: The European Cement Association.
- Çetinkaya, S., Kurt, H., & Kütük, N. (2017). Lightweight Geopolymer Made Of Pumice With Various Aluminum Powder Ratios. *Acta Physica Polonica A*, 544-545.
- Çevik, A., & Niş, A. (2023). *Introduction To Fiber-Reinforced Alkali-Activated Composites*. Elsevier.
- Çolak, C. (2018). Mechanical and Durability Properties of Alkali Activated Slag Concrete. *M.Sc. THESIS*. Istanbul Technical University.
- Davidovits, J. (1991). Inorganic Polymeric New Materials. *J Therm Anal*, 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cement. *International Conference on Alkaline Cements And Concretes* (pp. 131-149). Kiev: Kiev State Technical University.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. *In Geopolymer*, 9-39.
- Davidovits, J. (2005). *The Polysialate Terminology: A Very Useful And Simple Model for the Promotion And Understanding of Green-Chemistry*. Saint-Quentin France: Geopolymer Chemistry and Sustainable Development Solutions. Proceedings of The World Congress Geopolymer.
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications. *Institute Géopolymère*, 674.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement A Review. *Geopolymer Science And Technics*.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement A Review. *Institute Géopolymère*, 1-11.
- Davidovits, J., Davidovits, R., & Davidovits, M. (2012). Washington, DC Patent No. U.S. Patent No. 8,202,362.
- Demirel, B., & Yazıcıoğlu, S. . (2006). Pomza Taşı ile Elde Edilen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi (s. 367-374). Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*.
- Dinçer, R., & Çağatay, İ. H. (2004). Pomza ile yapılan hafif betonların mekanik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 247-260.
- Dolgun, O. (2010). Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Öğütülmüş Pomza Kullanılabilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde: Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Duque-Redondo, E., Yamada, K., & Manzano, H. . (2021). Cs retention and diffusion in CSH at different Ca/Si ratio. *Cement and Concrete Research*, 106294.

- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Van, & Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer Technology. *Journal of Materials Science*, 2917-2933.
- Ekici, B. B., & Demirel, B. (2007). Öğütülmüş Pomzanin Beton Basınç Dayanımına Etkisinin Yapay Sinir Ağı İle Belirlenmesi. *E Journal of New World Sciences Academy*, 9-11.
- El-Gamal, S. M. A., El-Hosiny, F. I., Amin, M. S., & Sayed, D. G. (2017). Ceramic Waste as an Efficient Material For Enhancing the Fire Resistance and Mechanical Properties of Hardened Portland Cement Pastes. *Construction and Building Materials*, 1062-1078.
- Erdoğan, G. (2022, Haziran). Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Perlit ve Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Nevşehir, Türkiye: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.
- Erdoğan, T. (1997). *Admixtures for Concrete*. Ankara: Middle East Technical University Press.
- Erdoğan, T. (2004). Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri. *THBB Yayınları*.
- Erdoğan, T. Y. (2015). *Beton*. Ankara: ODTÜ yayıncılık.
- Erdoğan, Y. (2007). Asidik ve Bazik Pomzadan Üretilen Yapı Malzemelerinin Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. *(doktora tezi)*. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erdoğan, Ş., & Kurbetçi, Ş. . (2003). Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 115-120.
- Erkoyun, H. (2005). *Pomzanin Türkiye'deki Yeri ve Önemi*. Isparta, Türkiye: Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi Bildirimler Kitabı.
- Eroğlu, G., & Şahiner, M. (2020). *Dünyada ve Türkiye'de Pomza*. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Erol, F., Al-mashhadani, M. M., Aygörmmez, Y., & Niş, A. (2023). Effect of Ceramic Waste Powder Content and Sodium Hydroxide Molarity on the Residual Mechanical Strength of Alkali Activated Mortars. *Materials Chemistry and Physics*, 128403.
- Ersoy A., Atıcı U. , & Yünsel T. Y. (2005). Pomzanin Çimento Sanayinde Katkı Maddesi Olarak Kullanımı. *Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi*, 105-111.
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R. (2020). Assessment of Important Parameters Involved In The Synthesis of Geopolymer Composites: A Review. *Construction and Building Materials*.

- Feng, X, & Clark, B. (2011). Evaluation of The Physical and Chemical Properties of Fly Ash Products for Use in Portland Cement Concrete. (pp. 1-8). In World of Coal Ash.
- Fernandez-Jimenez, Ana, & Palomo, A. (2005). Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. *Cement and Concrete Research*, 1984 – 1992.
- Glukhovsky, V. D. (1959). Soil Silicates . *Civil Engineering Institute Gosstroyizdat Ukrainy Publishing*, 154.
- Glukhovsky, V. D. (1965). Oil Silicates: Their Properties, Technology and Manufacturing and Fields of Application. *Doct. Tech. Sc. Degree Thesis*. Kiev, Ukraine: Civil Engineering Institute.
- Görhan, G. , & Kürklü, G. (2014). The Influence of The Naoh Solution on the Properties of the Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 371-377.
- Gourley J. T. (2003). Opportunities for Environmentally Friendly Construction Materials. *Adaptive Materials For A Modern Society*. Sydeny: The Materials 2003 Conference.
- Gourley J.T., & Johnson G.B. (2005). Developments in Geopolymer Precast Concrete. *Paper*. Perth, Australia: the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete.
- Gül, M. (2018). Hafif Beton Agregasi Olarak Atık Plastiklerin ve Pet’In Kullaniminin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Fırat Üniversitesi.
- Güllü, H., & Agha, A. A. (2021). The Rheological, Fresh And Strength Effects of Cold-Bonded Geopolymer Made with Metakaolin and Slag for Grouting. *Construction and Building Materials*, 122091.
- Gülşan, M., Alzebaree, R., Rasheed, A., Anıl Nis, & Kurtoğlu, A. (2019). Development of Fly Ash/Slag Based Self-Compacting Geopolymer Concrete Using Nano-Silica and Steel Fiber. *Construction and Building Materials*, 271-283.
- Gultekin, A., & Ramyar, K. (2023). Investigation of High-Temperature Resistance of Natural Pozzolan-Based Geopolymers Produced with Oven and Microwave Curing. *Construction and Building Materials*, 130059.
- Gündüz L. , & Şapcı N. (2005). Pomza Madenciliği, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör). *Süleyman Demiret Üniversitesi*. Isparta: Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi.
- Gündüz, L. (2001). Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi. *4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (s. 175-188). Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

- Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ., & Çankıran, O. (1998). Pomza Teknolojisi, Cilt-1. *Süleyman Demirel Üniversitesi Yayını*, 285.
- Güneyisi, E. (2004). Mechanical And Durability Performance of Plain and Blended Cement Concrete Exposed to Chlorides and Different Curing Regimes. *Ph.D. Thesis*. Istanbul, Turkey: Bogazici University Institute of Science.
- Hamid, M. A., Yaltay, N., & Türkmenoğlu, M. (2021). Properties of Pumice-Fly Ash Based Geopolymer Paste. *Construction and Building Materials*, 316.
- Hardjito, Djwantoro, & Rangan, B Vijaya. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.
- He, P., Jia, D., Lin, T., Wang, M., & Zhou, Y. . (2010). Effects of High-Temperature Heat Treatment on the Mechanical Properties of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Geopolymer Composites. *Ceramics International*, 1447-1453.
- Hewlett, P. (2003). *Lea'S Chemistry of Cement And Concrete*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Hossain K.M.A. (2004). Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Research*, 283-291.
- Hossain, K. M. (2003). Effect Of Volcanic Pumice On The Corrosion Resistance Andchloride Diffusivity Of Blended Cement Mortars. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 54-62.
- Hossain Anwar K.M. (2009). Resistance of Scoria-Based Blended Cement Concrete Against Deterioration and Corrosion in Mixed Sulfate Environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 299-308.
- Ibrahim, M., Johari, M. A. M., Rahman, M. K., Maslehuiddin, M., & Mohamed, H. D. (2018b). Enhancing The Engineering Properties and Microstructure of Room Temperature Cured Alkali Activated Natural Pozzolan Based Concrete Utilizing Nanosilica. *Construction and Building Materials*, 352-365.
- Irfan Khan M., Azizli K., Sufian S., & Man Z. (2015). Sodium Silicate-Free Geopolymers As Coating Materials: Effects of Na/Al and Water/Solid Ratios on Adhesion Strength. *Ceramics International*, 2794-2805.
- Jia, Shanshan, & Richardson, Ian G. (2018). Icro-And Nano-Structural Evolutions in White Portland Cement/Pulverized Fuel Ash Cement Pastes Due to Deionized-Water Leaching. *Cement and Concrete Research*, 191-203.
- Kabay, N., Tufekci, M. M., Kizilkanat, A. B., & Oktay, D. (2015). Properties of Concrete with Pumice Powder And Fly Ash as Cement Replacement Materials. *Construction and Building Materials*, 1-8.
- Kadhim, S., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Aljanabi, M. (2022). Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Slag-Based Geopolymer Mortars Incorporating Artificial Lightweight Aggregate Exposed to Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 125766.

- Kadiroğlu, İ. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine Deneysel bir Çalışma. *Batı Çim Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş.*, 7-11.
- Kalinkin, A. M., Gurevich, B. I., Kumar, S., Alex, T. C., Kalinkina, E. V., Tyukavkina, V. V., . . . Kumar, R. (2012). Geopolymerization Behavior Of Cu–Ni Slag Mechanically Activated In Air And In Co₂ Atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*, 101-106.
- Kani, E. N., & Allahverdi, A. (2011). Investigating Shrinkage Changes Of Natural Pozzolan Based Geopolymer Cement Paste. *Iran J. Mater. Sci. Eng*, 50-60.
- Kantarcı, F., Türkmen, I, & Ekinçi, E. (2019). Optimization of Production Parameters of Geopolymer Mortar And Concrete: a Comprehensive Experimental Study. *Construction and Building Materials*, 116770.
- Kantarcı, F. (2013). Elazığ Ferrochrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. İnönü Üniversitesi.
- Karaaslan, Cemal, & Yener, Engin. (2021). The Effect of Alkaline Activator Components on the Properties of Fly Ash Added Pumice Based Geopolymer. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 1255-1269.
- Karahan, O. (2006). Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri. *Doktora tezi*. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karakoç, M. B., Türkmen, İ., Maraş, M. M., Kantarcı, F., Demirboğa, R., & Toprak, M. U. . (2014). Mechanical Properties and Setting Time of Ferrochrome Slag Based Geopolymer Paste And Mortar. *Construction and Building Materials*, 283-292.
- Kartal, B. (2019). Polimerik Lif Katkili Güçlendirilmiş Jeopolimer Kompozit Malzeme Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*. Çanakkale: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Karthik, A, Sudalaimani, K, & Vijayakumar, CT. (2017). Durability Study on Coal Fly Ash-Blast Furnace Slag Geopolymer Concretes With Bio-Additives. *Ceramics International*, 11935-11943.
- Kaya, M. (2016). Farklı Tür Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Kesler, Y. (2009). Kalsit Katkılı Betonların Erken Yaş Mekanik Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Khalaj, Mohammad-Javad, Khoshakhlagh, Ali, Bahri, Sirous, Khoeini, Mahdi, & Nazerfakhari, Mohsen. (2015). Split Tensile Strength of Slag-Based Geopolymer Composites Reinforced with Steel Fibers: Application of Taguchi Method In Evaluating The Effect of Production Parameters and Their Optimum Condition. *Ceramics International*, 10697-10701.

- Koçak, B. (2023). Yüksek Firin Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçlarının Basınç Dayanımı Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Türkiye: Kırklareli Üniversitesi.
- Köker, T. Ş. (2019). Hafif Agrega Katkili Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabllıkte Özellikler. *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerization: A Review and Prospects for the Minerals Industry. *Minerals Engineering*, 1261-1277.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. . (2007). Comparative Performance of Geopolymers Made with Metakaolin and Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 1583--1589.
- Küçükyıldırım, E., Yorulmaz, H., Durak, U., İlkentapar, S., Uzal, B., Karahan, O., & Atis, C.D. (2023). Reaction Kinetics and Properties of Pumice-Based Geopolymer Systems Cured at Room Temperature. *Construction and Building Materials*, 134074.
- Kumaravel, S , & Girija, K. (2013). Acid and Salt Resistance of Geopolymer Concrete with Varying Concentration of NaOH. *Journal of Engineering Research and Studies*, 1-3.
- Kupaei, R. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2014). The Effect of Different Parameters on the Development of Compressive Strength of Oil Palm Shell Geopolymer Concrete. *The Scientific World Journal*, 898536.
- Kurt, H. (2016). İnorganik Malzemelerle Jeopolimer Sentezi ve Pomza Taşının Jeopolimer Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi.
- Kütük, N. (2013). İnorganik Malzemeler Kullanarak Jeopolimer Sentezi ve Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi.
- Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., & Ryle, R. (2003). Cementitious Additions. In J. N. Choo., *Advanced Concrete Technology* (pp. 3-59). Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd.
- Li, G. (2004). Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-Sio2. *Cement and Concrete Research*, 1043-1049.
- Liban, R. I. (2022). Taguchi Yöntemi ile Uçucu Kül ve Kalker Katkili Zeolit Esaslı Geopolimer Harçların Tasarlanması. *Doktora Tezi*. Konya, Türkiye: Konya Teknik Üniversitesi.
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., & Kamarudin, H. (2016). Structure and Properties of Clay-Based Geopolymer Cements: A Review. *Progress in Materials Science*, 595-629.

- Lloyd, N., & Rangan, V. (2010). Geopolymer Concrete with Fly Ash. *In Proceedings of The Second International Conference on Sustainable Construction Materials And Technologies* (pp. 1493-1504). Ancona, Italy: UWM Center.
- Majidi, B. (2009). Geopolymer Technology, From Fundamentals to Advanced Applications. *Materials Technology*, 79-87.
- Mamaseni, B. M. (2021). Development and Properties of Pumice Based Geopolymer Incorporated Nanosilica with Sodium And Pottasium Base Activators At Various Rest Period. *MS.c. Thesis*. Van, Türkiye: Van Yuzuncul Yil University.
- Mehta, Ankur, & Siddique, Rafat. (2017). Sulfuric Acid Resistance of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 136-143.
- Mehta, P. K. , & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. New York, USA: Mcgraw-Hill 4th Ed.
- Mesci, B., Ergun, O. N., & Çakıroğlu, M. (2007). Bakır Endüstri Atıklarının Beton Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 2. *Yapılarda Kimyasal katkılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (s. 299-309). içinde Ankara.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Influence of Aggregate Gradation on Concrete Performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 245–257.
- Mucsi, G. , & Ambrus, M. (2017). Raw Materials for Geopolymerisation. *Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing*.
- Nadoushan, M. J., & Ramezani pour, A. A. . (2016). The Effect of Type And Concentration of Activators on Flowability and Compressive Strength of Natural Pozzolan and Slag Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 337-347.
- Najafi Kani, Ebrahim, & Allahverdi, Ali. (2009). Effects of Curing Time and Temperature on Strength Development of Inorganic Polymeric Binder Based on Natural Pozzolan. *Journal of Materials Science*, 3088-3097.
- Nazaroglu, M. B. (2019). Zeminlerin Özelliklerini Uçucu Kül ile iyileştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Niş, A., & Altındal, İ. (2021). Compressive Strength Performance of Alkali Activated Concretes Under Different Curing Conditions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 556-565.
- Niş, A., & Bilenler Altındal, M. (2023). Durability Performance of Alkali-Activated Concretes Exposed to Sulfuric Acid Attack. *Revista De La Construcci*, 16-35.
- Niş, A., Alzebaree, R., Mohammedameen, A., Çevik, A., Gülşan, M., & Mehmet, E. (2024). Microstructural and Durability Assessment of Various Concrete Types Under Different Chemical Environments. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-14.

- Occhipinti, R., Strosio, A., Finocchiaro, C., Fugazzotto, M., Leonelli, C., Faro, M. J. L., & , Mazzoleni, P. (2020). Alkali Activated Materials Using Pumice From the Aeolian Islands (Sicily, Italy) and Their Potentiality for Cultural Heritage Applications: Preliminary Study. *Construction and Building Materials*.
- Okonkwo, V. O., Onodagu, P. D., & Ubani, O. U. (2019). An Evaluation of Geopolymer Cement in Construction Work. *American Journal of Engineering Research*, 58-66.
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Designed by Taguchi Method. *Materials and Design*, 191-198.
- Özcan, A. (2006). Endüstriyel Atıklar ve Polipropilen Lif İçeren Saha Betonlarının Özelliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Zonguldak: Karaelmas Üniversitesi.
- Özodabaş, A. , & Yılmaz, K. (2013). Improvement of the Performance of Alkali Activated Blast Furnace Slag Mortars with Very Finely Ground Pumice. *Construction and Building Materials*, 26-34.
- Özturan, T. (1991). Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği. *2.Ulusal Beton Kongresi*, , (s. 280–293). İstanbul.
- Petermann, Jeffrey C, Saeed, Athar, & Hammons, Michael I. (2010). Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review. *Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division*.
- Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances In Understanding Alkali-Activated Materials. *Cement and Concrete Research*, 110-125.
- Provis, J., & Van Deventer, .. J. (2009). *Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Melbourne, Australia: Elsevier.
- Ramezaniapour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials*. Springer.
- Rashad, A. M. (2014). A Comprehensive Overview About The Influence of Different Admixtures and additives on the Properties of Alkali-Activated Fly Ash. *Materials & Design*, 1005-1025.
- Rashad, Alaa M, & Zeedan, Sayieda R. (2011). The Effect of Activator Concentration on the Residual Strength of Alkali-Activated Fly Ash Pastes Subjected to Thermal Load. *Construction and Building Materials*, 3098-3107.
- Reyhanoğlu, M. (1988). Pomza ve Kullanım Alanları. *Yüksek Lisans Tezi*. Adana: Çukurova Üniversitesi.
- Robayo-Salazar, R. A., Arcila, J. M., & Gutiérrez, R. M. (2017). Eco-Efficient Alkali Activated Cement Based on Red Clay Brick Wastes Suitable for The Manufacturing of Building Materials. *Journal of Cleaner Production*, 242-252.

- Safari, Zrar, Kurda, Rawaz, Al-Hadad, Botan, Mahmood, Faraydon, & Tapan, Mucip. (2020). Mechanical Characteristics of Pumice-Based Geopolymer Paste. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Sarker, Prabir Kumar, & Mcbeath, Simon. (2015). Fire Endurance of Steel Reinforced Fly Ash Geopolymer Concrete Elements. *Construction and Building Materials*, 90-91.
- Sarker, Prabir Kumar, Kelly, Sean, & Yao, Zhitong. (2014). Effect of Fire Exposure on Cracking, Spalling and Residual Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete. *Materials & Design*, 584-592.
- Selim, F. A., Amin, M. S., Ramadan, M., & Hazem, M. M. . (2020). Effect of Elevated Temperature and Cooling Regimes on the Compressive Strength, Microstructure And Radiation Attenuation of Fly Ash–Cement Composites Modified with Miscellaneous Nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 119648.
- Şengün, N. (2004). Pomzanin Hafif Harç Yapiminda Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanimi. *Yüksek Lisans Tezi*. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Şengün, N. (2004). Pomzanin Hafif Harç Yapiminda Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanimi. *Yüksek Lisans Tezi*. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Shayan, A. (2016). Specification and Use of Geopolymer Concrete in the Manufacture of Structural and Non-structural Cmponents. *Review of Literature* , (No. AP-T318-16).
- Shi, C. (2001). *An Overview on the Activation of Reactivity of Natural Pozzolans*. Springer.
- Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2003). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. CRC press.
- Si, Ruizhe, Guo, Shuaicheng, & Dai, Qingli. (2019). Influence of Calcium Content on the Atomic Structure and Phase Formation of Alkali-Activated Cement Binder. *Journal of the American Ceramic Society*, 1479-1494.
- Singh, B., Ishwarya G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S.K. (2015). Geopolymer Concrete: A Review Of Some Recent Developments. *Construction and Building Materials*, 78-90.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an Alternative to Portland Cement : An Overview. *Construction and Building Materials*.
- Soutsos, M., Boyle, Alan P, Vinai, Raffaele, Hadjierakleous, Anastasis, & Barnett, Stephanie J. (2016). Factors Influencing The Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 355-368.

- Srividya, T, PR, Kannan Rajkumar, Sivasakthi, M, Sujitha, A, & Jeyalakshmi, R. (2022). A State of the Art on Development of Geopolymer Concrete and its Field Applications. *Case Studies in Construction Materials*, e00812.
- Swamy R. N. (1997). Design For Durability and Strength Through The Use of Fly Ash and Slag in Concrete. *Special Publication*, T. 171. – C. 1-72.
- Taddeucci, J. (2015). Hawaiian And Strombolian Eruptions //The Encyclopedia of Volcanoes. *Academic Press*, 485-503.
- Tapan, M., Depci, T., Özvan, A., Efe, T., & Oyan, V. (2013). Effect of Physical, Chemical and Electro-Kinetic Properties of Pumice on Strength Development of Pumice Blended Cements. *Materials And Structures/Materiaux Et Constructions*, 1695-1706.
- Thokchom, S , Ghosh, P, & Ghosh, S . (2010). Performance of Fly Ash Based Geopolymer Mortars in Sulphate Solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 36-40.
- Tokay, M., & Ayturan, P. (2010). Mineral Katkılarının Alkali ile Aktive Edilmesi: Bölüm 2. *Çimento ve Beton Dünyası*, 77-91.
- Tokay, M., & Erdoğan, K. . (1998). *Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Külün Karakterizasyonu*. Ankara: TÇMB AR-GE.
- Tokay, M., & Erdoğan, K. (2009). *Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Toregaliyev, B. (2022). Geopolimer Harçlarda Öğütölmüş Bazık Pomza ve Silis Dumanının Bağlayıcı Olarak Kullanılmasının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Antalya: Akdeniz Üniversitesi.
- Tuntaş, A. (2023). Kulemanit Atığı ve Pomza Tozu ile Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*. Van, Türkiye: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Türkel, S. , & Kadioğlu, B. (2007). Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Faköltesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 353-359.
- Türkel, S. , & Kadioğlu, B. (2007). Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Faköltesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 353-359.
- Türker, F. , Aköz, F, Koral, S., & Yüzer, N. (1997). Effects of Magnesium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars With and Without Silica Fume. *Cement and Concrete Research*, 205-214.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A. (2009). *Türkiye'deki Uçucu Külün Sınıflandırılması ve Özellikleri*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.

- Ünal, O., & Uygunoglu, T. (2004). *Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi*. Zonguldak: Türkiye: 14 Komur Kongresi Bildiriler Kitabı.
- Van-Chanh, N., Trung, B.D. , Van-Tuan, D., & Candidate M.E. (2008). Recent Research Geopolymer Concrete. *The 3rd Acf International Conference-Acf/Vca* (pp. 235-241). Vietnam: University of Technology HCM City.
- Villa C., Pecina E.T., Torres R., & Gómez L. (2010). Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite. *Construction and Building Materials*, 2084-2090.
- Virgalitte, S. J., Luther, M. D., Rose, J. H., & Mather, B. (1987). Granulated Blast-Furnace Slag as A Cementitious Constituent In Concrete. *ACI Materials Journal*, 327-342.
- Wallah, Steenie, & Rangan, B Vijaya. (2006). *Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties* . Perth, Australia: Faculty of Engineering Curtin University of Technology Research Report GC 2.
- Wang, J., Hu, Z., Chen, Y., Huang, J., Ma, Y., Zhu, W., & Liu, J. (2022). Effect Of Ca/Si And Al/Si on Micromechanical Properties of C (-A)-Sh. *Cement and Concrete Research*, 106811.
- Wang, Kai-tuo, He, Yan, Song, Xiao-ling, & Cui, Xue-min. (2015). Effects of the Metakaolin-Based Geopolymer on High-Temperature Performances of Geopolymer/Pvc Composite Materials. *Applied Clay Science*, 586-592.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2017). Comparison of Long Term Performance Between Alkali Activated Slag and Fly Ash Geopolymer Concretes. *Construction and Building Materials*, 272-279.
- Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2010). Compressive Strenght, Modulus of Elasticity, And Water Permeability of Inorganic Polymer Concrete. *Materials & Design*, 4748-4754.
- Xu, H. , & Deventer, J. S. J. (2000). The Geopolymerisation Of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal Of Mineral Processing*, 247-266.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R. (2015). The Effects Of Silica Modulus And Aging on Compressive Strength of Pumice-Based Geopolymer Composites. *Construction and Building Materials*, 767-774.
- Yalghuz, M. R. (2020). Farklı Tip Malzemeler Kullanılarak Geopolimer Harç Üretimi ve Dayanıklılığın İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir: Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Yanık, S. (2007). Bazik Pomzaların Beton Agregasi Olarak Kullanılabilirliği. *Yüksek Lisans Tezi*. Adana: Çukurova Üniversitesi.
- Yaşın, S. (2010). Alunitli Kaolinler İle Jeopolimer Sentezi. *Yüksek Lisans Tezi*. Kütahya: Dumlupınar Üniversitesi.

- Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E., & Gönen, T. (2003). Pomza Taşının Kullanım Alanları ve Ekonomiye Etkisi. *Fırat Üniversitesi DAUM Dergisi*, 118-123.
- Yıldırım, A. N. (2007). Pomza ve Uçucu Kül Kullanılarak İmal Edilen Hafif Betonların Agresif Su Ortamlarında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yildiz, K., & Ugur, L. O. (2009). The Effect of Mineral Admixture Type on the Modulus of Elasticity of High Strength Concrete. *Scientific Research and Essay*, 791-798.
- Yılmaz, A., Ergün, S., Uysal, M., Aygörmez, Y., & Aygun, B. F. (2024). Exploration of Fiber Reinforced Geopolymer Mortars Containing Recycled Aggregates and Marble Powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 5179-5202.
- Zeng, L., Cao, D. Y., Xu, Y., Fan, C. W., & Peng, X. Q. (2014). Novel Method for Preparation of Calcined Kaolin Intercalation Compound-Based Geopolymer. *Applied Clay Science*, 637-642.
- Zhang Z., Yao X., & Zhu H. (2010 b). Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete 2. Microstructure and Anticorrosion Mechanism. . *Applied Clay Science*, 7-12.
- Zhang Z., Yao X., & Zhu H. (2010 a). Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete 1. Basic properties. *Applied Clay Science*, 1-6.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., & Qi, S. L. (2016). Comparative Thermal and Mechanical Performance of Geopolymers Derived From Metakaolin and Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04015092.
- Zhang, Hai Yan, Kodur, Venkatesh, Wu, Bo, Cao, Liang, & Qi, Shu Liang. (2016). Comparative Thermal and Mechanical Performance of Geopolymers Derived From Metakaolin and Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04015092.
- Zhu, Xiaohong, & Richardson, Ian G. (2023). Morphology-Structural Change of CASH Gel in Blended Cements. *Cement and Concrete Research*, 107156.

ÖZGEÇMİŞ

TAHA SALAH WAHHAB AL-ANTAKİ M.Sc.	
PROFILE Civil engineer with a Master's degree and a proven track record in designing and implementing eco-friendly academic research projects. Successfully led three projects utilizing natural materials to produce sustainable concrete, reducing structural loads and minimizing earthquake damage. Committed to developing innovative solutions that promote efficiency and environmental sustainability in construction.	EDUCATION ALMUSTANSIRIYAH UNIVERSITY 2012-2016 Bachelor of Science in Civil Engineering İ.G.Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnş. A.B.D. 2018-2020 Master of Science in Civil Engineering İ.G.Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnş. A.B.D. 2020-2024 Doctor of Philosophy in Civil Engineering WORK EXPERIENCE Ahram Alfurat Civil engineer 2016 - Present Collaborated with a specialized engineering team to oversee multiple projects, conducting site visits to ensure compliance with specifications Coordinated with external vendors to secure high-quality materials for project execution JMH INTERNATIONAL Head of Branch 2019-2022 SKILLS Office... AutoCAD SketchUp Primavera P6 ETABS
NATIONALITY IRAQ HOBBIES Traveling and exploring new cities Swimming Skydiving Every kind of sport	

