



**T.C.**

**HİTİT ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İLERİ MALZEMELER VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI**

**ALÜMİNA SİLİKAT KAYNAKLARI KULLANARAK  
GEOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİ İLE YAPISAL SERAMİK  
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Doğın KAFKAS**

**Çorum - 2022**



**ALÜMİNA SİLİKAT KAYNAKLARI KULLANARAK  
GEOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİ İLE YAPISAL SERAMİK ÜRETİMİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Doğın KAFKAS**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İleri Malzemeler ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**TEZ DANIŞMANI**

**Doç. Dr. Cengiz BAĞCI**

**Çorum 2022**

Doğan KAFKAS tarafından hazırlanan “Alümina Silikat Kaynakları Kullanarak Geopolimerizasyon Yöntemi ile Yapısal Seramik Üretiminin” adlı tez çalışması 28/09/2022 tarihinde aşığıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliğı/oy çokluğu ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İleri Malzemeler ve Nanoteknoloji Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

(BAŞKAN)\*

Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ

(DANIŞMAN)\*\*

Doç.Dr. Cengiz BAĞCI

(JÜRİ)

Doç. Dr. Hanefi ÇİNİCİ

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve ..... sayılı kararı ile Doğan KAFKAS 'ın İleri Malzemeler ve Nanoteknoloji Anabilim Dalında Yüksek Lisans/Doktora derecesi alması onanmıştır.

(İmza)

Unvanı Adı SOYADI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Doğan KAFKAS



# ALÜMİNA SİLİKAT KAYNAKLARI KULLANARAK GEOPOLİMERİZASYON YÖNTEMİ İLE YAPISAL SERAMİK ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Doğan KAFKAS

ORCID: 0000-0001-5332-9916

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

Eylül 2022

## ÖZET

Son zamanlarda, geopolimer sentezinde metakaolin ve füme silika yerine farklı tipte alüminosilikatlar kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı geopolimerik yöntem ile yapısal malzeme sentezinde metakaolin yerine bir alüminasilikat olan ülkemiz pomzasının uygunluğunu araştırmaktadır. Başlangıç malzemesinin sonuç yapısal malzeme özelliklerini etkilediği düşünülerek, araziden alınan pomza XRF, XRD ve NMR analizleri ile karakterize edilmiştir. Araziden alındığı gibi ve metakaolin eklenmiş pomzalar, bir NaOH ve sodyum silikat çözeltilerinde çözündürüldü. Böylece, alışılmış metakaolin ve füme silikanın farklı oranlarının katılmasıyla bir dizi geopolimer bulamaç elde edildi. Bulamaçlar, mekanik testler için geopolimer numuneleri elde etmek üzere poliasetal bir kalıba döküldü ve sabit 50 °C sıcaklık/nemli fırında 24 saat kürlendi ve ardından oda sıcaklığında ilave kürlenme için bir hafta bırakıldı. Nihai geopolimer numunelerinin mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonları XRD, SEM, 3-nokta eğilme, basınç testleri ve termal iletkenlik katsayısına dayandırılmıştır. Mekanik testler ASTM standartlarına göre yapıldı ve ölçülen değerler Weibull istatistikleri ile de analiz edildi. Sonuçların değerlendirilmesi ile pomzanın az miktarda metakaolin ve füme silika ilavesi ile reaktivitesini geliştirerek yapısal malzeme üretiminde alternatif bir alüminosilikat kaynağı olarak kullanılabileceğini görülmüştür.

**Anahtar Kavramlar:** Alüminasilikat, Geopolimerizasyon, Yapısal seramik.

**Bilim Kodu:** 20215, 91127, 91526.

# INVESTIGATION OF STRUCTURAL MATERIAL PRODUCTION WITH GEOPOLYMERIZATION METHOD USING ALUMINA SILICATE RESOURCES

Doğan KAFKAS

ORCID: 0000-0001-5332-9916

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science Thesis

September 2022

## ABSTRACT

Recently different types of aluminosilicates have been used as a replacement for metakaolin and fumed silica in synthesis of geopolymeric materials. This study investigates the suitability of pumice from the Turkish origin as a replacement for metakaolin in synthesis of geopolymeric structural materials. Considering that the starting material affects the resultant geopolymer, as-received pumice was characterized by XRF, XRD and NMR analysis. As received and metakaolin added pumices were dissolved in a NaOH and sodium silicate solutions. Thus, a series of geopolymer pastes were obtained by introducing the different proportions of usual metakaolin and fumed silica. The slurries were casted into a poliasetal mold to obtain geopolymer samples for mechanical tests and cured in a constant 50 °C temperature/humidity oven for 24 h, and then left one week for additional curing at ambient temperature. The microstructural and mechanical characterizations of final geopolymer samples were based on XRD, SEM, 3-point bending and compressive tests. The mechanical tests were made according to ASTM standards and measured values were further analyzed by Weibull statistics. By the assessment of the results showed that the pumice can be used as an alternative aluminosilicate source by improving its reactivity with small amount of metakaolin and fumed silica additions in a structural materials production.

**Key Terms:** Alumina silicate, Geopolymerization, structural ceramic.

**Science Code:** 20215, 91127, 91526.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca gerek teorik ve gerekse deneysel kısımlarında engin bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren tez danışmanın, değerli hocam Doç. Dr. Cengiz BAĞCI'ya teşekkürü bir borç bilir saygılar sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarımda emeği geçen, Yüksek Makine Mühendisi Ramazan KAVLAK'a, Makine Mühendisi Halit MÜFTÜOĞLU'na, Elektrik ve Elektronik Mühendisi K.Mehmet ÖZSOY'a teşekkür ederim. Ayrıca geopolimerik yöntem konusunda tecrübelerinden faydalandığımız Illinois Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği'nden Prof W. M.Kriven'a ve Devon Samuel'e, finansal desteğinden dolayı Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine 'proje no: MUH19004.21.010 ve Yüksek Lisans yaptığım yıllar boyunca manevi destekleri ile yanımda olan sevgili eşime, aileme teşekkür ederim.

Doğan KAFKAS

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xii
GİRİŞ.....	1

### 1. BÖLÜM

#### YAPISAL MALZEMELER

1.1. Beton.....	3
1.2. Tuğla .....	3
1.3. Bims .....	4
1.4. Gaz Beton .....	4

### 2. BÖLÜM

#### ALÜMİNA SİLİKAT KAYNAKLARI

2.1. Metodoloji.....	6
2.2. Uçucu Kül.....	6
2.3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC).....	7
2.4. Metakaolin .....	7
2.4.1. Metakaolin geopolimerlerin oluşumu.....	7
2.5. Silis Dumanı (füme silika).....	8
2.6. Pomza .....	8
2.6.1. Pomzanın oluşumu ve özellikleri.....	8

	<b>Sayfa</b>
2.6.2. Pomza reaktivitesi.....	9
2.6.3. Si/Al oranı.....	9
2.6.4. Suyun rolü.....	10
2.7. Geopolimer Tuğlalar .....	10
2.7.1. Geopolimer tuğlada aranan özellikler.....	11

### **3. BÖLÜM**

#### **GEOPOLİMERİZASYON**

3.1. Geopolimer Teknoloji.....	14
3.2. Geopolimerleşme .....	14
3.3. Geopolimerleşme Kimyası.....	16
3.4. Geopolimer ve Zeolitlerin Karşılaştırılması .....	17
3.5. Geopolimer Teknolojisi ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar .....	20

### **4. BÖLÜM**

#### **DENEYSEL ÇALIŞMA**

4.1. Başlangıç Malzeme Karakterizasyonu.....	23
4.1.1. X-Işını floresan spektroskopisi (XRF).....	24
4.1.2. X-Işını difraksiyon analizi (XRD) .....	24
4.1.3. Nükleer manyetik rezonans analizi (NMR) .....	24
4.2. Geopolimerizasyon Yöntemi ile Öncü Yapısal Malzeme Üretimi .....	25
4.3. Geopolimerizasyon Yöntemi ile Yapısal Malzeme Üretimi .....	29
4.4. Sonuç Yapısal Malzeme Karakterizasyonu .....	31
4.4.1. Üç nokta eğme testi.....	31
4.4.2. Basma testi.....	31
4.4.3. XRD testi.....	31
4.4.4. Taramalı elektron mikroskop analizi (SEM).....	31
4.4.5. Weibull istatistiksel analizi.....	32

## 5. BÖLÜM

### MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER

	Sayfa
5.1. Mikroyapı ve Mekanik Özellikler .....	35
<b>SONUÇLAR</b> .....	<b>48</b>
<b>KAYNAKÇA</b> .....	<b>49</b>



## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 4.1.</b> Başlanğıç malzemesi XRF sonuçları; a) Ahlat taşı, b) Pomza-1 taşı.....	25
<b>Tablo 4.2.</b> Osit bileşikleri açısından kantitatif tarama pomza-2 bileşimi .....	27
<b>Tablo 4.3.</b> Pomza-2 malzemesine ilave edilenlerin miktarları.....	30
<b>Tablo 5.1.</b> Basma testinin sonuçlarının özeti.....	41
<b>Tablo 5.2.</b> Eğme testi sonuçlarının özeti .....	47
<b>Tablo 5.3.</b> Isıl iletkenlik ve yoğunluk testi sonuçlarını.....	47

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. (a) Geopolimerleşmenin kavramsal bir modeli (Duxson ve ark., 2007), (b) Davidovits'e göre geopolimerleşme mekanizmaları (Davidovits, 1991).....	16
Şekil 3.2. Polimerik Mn-(-Si-O-Al-O-)n poli(sialat) ve Mn-(-Si-O-Al-O-Si-O-)n poli(sialat-silokso) ve ilgili iskelet (Comrie, D.C., 1988).....	19
Şekil 4.1. Deneysel çalışmalar şeması.....	23
Şekil 4.2. Orijinal başlangıç malzemeleri a) Ahlat taşı b) pomza taşı.....	24
Şekil 4.3. Başlangıç malzemesi XRD sonuçları; a) Ahlat taşı b) pomza-1 taşı.....	25
Şekil 4.4. Bulamaç metal kalıba numune difüze olduğu görüldüğünden poliasetal kalıp yapılmıştır.....	26
Şekil 4.5. Başlangıç malzemesi XRF sonuçları; a) Ahlat taşı b) pomza taşı.....	26
Şekil 4.6. Pomza-2 malzemesinin doğrudan ve 750 °C'de 2 saat ısıl işlem sonrası XRD sonuçları.....	27
Şekil 4.7. Orijinal ve ısıl işlem görmüş pomza-2 numuneleri için <sup>27</sup> Al NMR spektrumları. Dönen yan bantlar 175 ve -75 ppm'de görünür.....	28
Şekil 5.1. Üretilen 14 M numuneleri ve orijinal pomza-2 nin XRD desenleri.....	35
Şekil 5.2. Üretilen 14 M numuneleri ve orijinal pomza-2 nin XRD desenleri.....	36
Şekil 5.3. Metakaolin numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri; (a) MK_8M (b) MK_14M (C) MK_20M.....	37
Şekil 5.4. Silis dumanı numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri ; (a) FS_18M (b) FS_14M (C) FS_20M. ....	39
Şekil 5.5. Silis dumanı ve matakaolin numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri ; (a) FS+MK_8M (b) FS+MK_14M (C) FS+MK_20M.....	40
Şekil 5.6. 14 M numunesinin basma testi sonuçlarından yük-uzama eğrileri. ....	42
Şekil 5.7. Üretilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri; (a) MK_14M (b) FS_14M (c) FS+MK_14M (d) FS+MK_8M (e) FS+MK_20M. ....	43
Şekil 5.8. Üretilen numunelerin parlatılmış yüzey SEM görüntüleri; (a) MK_14M (b) FS_14M (c) FS+MK_14M (d) FS+MK_8M (e) FS+MK_20M. ....	44

Şekil 5.9. Silis dumanı ve matakaolin numunelerin eğme dayanımı olasılık grafikleri ; (a)  
MK\_14M (b) FS\_14M (C) FS+MK\_14M. ....43



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\sigma$	Gerilme
F	Kuvvet
l	Destekler arası mesafe
w	Numune genişliği
t	Numune kalınlığı
A	Numune kesit alanı

### Kısaltmalar

GP	Geopolimer
XRD	X-ışınları Kırınımı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
ÖYFC	Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufu
MK	Metakaolin
FS	Silis Dumanı
GPC	Geopolimer Beton
OPC	Portlandçimento

## GİRİŞ

Günümüzde artan şehirleşmeye paralel olarak inşaat sektöründe ihtiyaç duyulan yapı taşı talebi de artış göstermiştir. Betonarme yapılarda önemli sorun olarak görülen yapı ağırlığının azaltılabilmesi için günümüze kadar çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerde hafifliğin aranılan temel özellik olmasının yanında, dayanım, yüksek sıcaklığa karşı direnç, yüksek ısı yalıtımı gibi özelliklerin de elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Hafif ve ısı yalıtımı özellikleri iyi olan malzemelerin kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Normal ağırlıklı beton inşaat sektöründe günümüzde en çok kullanılan taşıyıcı malzemedir. Çok iyi bir taşıyıcı malzeme olmasına karşın birim ağırlığı yüksektir. Bu nedenle yapılarda ağırlıklar çok yüksek boyutlara ulaşmaktadır. Normal ağırlıklı betonun birim ağırlığının azaltılmasıyla, yapı veya yapı elemanının ağırlığını azaltarak, ekonomi ve emniyet avantajları sağlamak mümkündür. Özellikle hafif yapı elemanları olarak kullanılan gazbeton, bimsblok üretimi ve bu sektördeki rekabet son yıllarda gittikçe artmıştır. Gerek statik olarak yapılara gelen yükün azaltılması gerekse sevkiyatlar ve şantiye içi yatay-düşey taşımalar esnasındaki ekonomikliğin sağlanmasında malzemenin birim hacim kütesinin rolü çok büyüktür.

Son yıllarda, inşaat sektörü çevre dostu malzemeleri teşvik etmeye çalışmaktadır. Giderek artan bir literatür, uçucu kül esaslı geopolimerler ve pomza, çimeto ve yapı malzemeleri konusunda umut verici bir alternatif olarak kabul edilir. Ancak, özellikle pomza esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklığa maruz kalması ve yangına dayanıklılığı ile ilgili ayrıntılı ve derinlemesine bir inceleme hala eksiktir. Davidovits tarafından geopolimerizasyon reaksiyonunun keşfinden bu yana, bu yöntem farklı tipte yapı malzemelerinde ( tuğla çatı kiremitleri, beton, yol kaplama malzemesi ve hatta uçak kaplamalarında) kullanılmaktadır. Geopolimerin hazırlanması esas olarak bir alkalın aktivatörün bir bağlayıcı malzeme ile reaksiyona girmesine esasına dayanır. Alümina silikat genellikle kaolinin 600 °C'nin üzerinde kalsinasyonu ile elde edilen metakaolinden, uçucu külden ya da yüksek fırın cürufundan oluşur. Alkali aktivatörler ise genellikle belirli bir toplam sodyum oksit içeriğini korumak için farklı oranlarda kostik soda ve sodyum silikattan oluşur. Bu bağlamda alümina silikatın NaOH oranındaki bir artışı, ortaya çıkan geopolimerin artan mukavemeti ile ilişkili olduğu çıkarımları vardır. Geopolimerik malzemelerin kullanım kapsamı, yangına dayanıklı geopolimer, aside dayanıklı harçlar ve betonlar ve ayrıca yalıtkan tuğlalar gibi çok sayıda yeni uygulamalardır.

Bu çalışmanın amacı alüminasilikat doğal hammaddeler (pomza taşı) kullanılarak geopolimerizasyon ile düşük sıcaklıklarda inorganik seramik polimerik yapısal malzeme üretimi, mühendislik özelliklerini ve sürdürülebilirlik etkilerini, kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Başlangıç malzemeleri özellikle geopolimer formülasyonu için alümina ve silika bakımından karakterize edilecek diğer safsızlıklarla birlikte geopolimerizasyon için modifiye edilecektir ve geopolimerik yapısal malzeme eldesi sağlanmaya çalışılacaktır.

Elde ettiğimiz sonuçlar ise; Pomza ile üretilen blok elemanlar standart yapı elemanlarından dayanım değerlerini sağlaması yanında, daha iyi yalıtım özelliğine sahip olması bölme elemanları için kullanılmasına bir avantaj teşkil ettiği gözlemlenmektedir. İçerdikleri boşluk miktarından dolayı yalıtım amaçlı hafif beton ve hafif blok eleman üretiminde pomza malzemesi halen yaygın olarak değerlendirilmektedir. Gelişen inşaat teknolojilerinde gittikçe talep edilen bir ürün olan hazır bölme duvar elemanlarının, yerel kaynaklarımızdan ve doğal bir agrega olan pomzanın kullanımı ile üretilebilirliğini göstermektedir.



# 1. BÖLÜM

## YAPISAL MALZEMELER

Güncel teknoloji ve günümüze kadar gelişen teknolojiler insan ihtiyaçlarına göre malzemelerin yapısal olarak çalışılması ve istenen özelliklerin kazandırılmasına yöneliktir. Buna örnek olarak yapı ve çeşitli araçlarda kullanılan malzeme teknolojilerinin özelliklerini ele alacak olursak, malzeme hacim özellikleri olarak da bilinen taşıma kapasitesi, esneklik, kırılmazlık düzeyi, yanmazlık, ısı ve sesi tutma kapasitesi, geçirgenlik, kimyasal direnç gibi malzeme özellikleri insanların artan ihtiyaçlarına ve karmaşıklaşan amaçlarına göre şekillenmektedir. Yeni malzemeler geliştirirken aynı zamanda en ekonomik, çevreye en dostu ve doğal kaynakların etkin kullanımı, yüksek teknoloji ve maliyet gerektirmeyen, kısaca sürdürülebilir malzemelerin üretimi önem kazanmıştır. Yapı endüstrisi gibi dünya ekonomisinin yaklaşık % 70'ini oluşturan bir sektörde üretilen iş ve malzemelerin sürdürülebilir özellikte olması ise artık elzemdir.

### 1.1. Beton

Beton ve çelik, yapı malzemesi anlamında en yaygın kullanılan iki malzemedir. Her ikisinin önemi farklı olmasına rağmen mühendis, genellikle yapının yapıldığı beton hakkında çelikten daha az bilgiye sahiptir. Çelik, dikkatlice kontrol edilen koşullar altında üretilmektedir, özellikleri bir laboratuvarında belirlenir ve bu özellikler, üreticinin sertifikasında açıklanır. Bu nedenle, çelik konusunda, proje tasarımcısının yalnızca çeliği ilgili bir standarda uygun olarak belirtmesi ve uygulamadaki mühendisin donatıyla ilgili işçiliği denetlemesi yeterlidir. Fakat bir şantiyede beton için durum tamamen farklıdır. Beton bileşenlerinden olan çimentonun kalitesinin üretici tarafından çeliğe benzer bir şekilde garanti edildiği doğrudur ve uygun çimentonun seçilmesi koşuluyla beton bir yapıda çimento kaynaklı problem, hemen hemen hiç yoktur. Ancak yapıda kullanılan malzeme, çimento değil betondur. Beton yapı elemanları ise çoğunlukla bir fabrikada üretilmemekte ve bu elemanların kalitesi üretildikleri betonun tasarım, uygulama ve bakımına bağlı olmaktadır (Neville 1995).

### 1.2. Tuğla

Tuğlalar inşaatta önemli bir rol oynuyor bazı üstün özellikleri nedeniyle; büyük dayanıklılık, yüksek mukavemet, düşük maliyetler vb. özellikleri nedeni ile en çok tercih edilen yapı malzemesi olmuştur.

Modern tuğla pişiriminde genel olarak 6 aşama vardır. Döngü: buharlaşma (20–150 °C), dehidrasyon (149–650 °C), oksidasyon (300–982 °C), vitrifikasyon (900–1316 °C), yanıp sönme (1150–1316 °C) ve soğutma (1316–20 °C). Buharlaşma aşaması hammaddelerdeki

nem içeriğinin uzaklaştırılmasını gerektirir ve tuğla şekillendirme için su eklenir. Kademeli sıcaklık artışını nedeni; bu aşamadaki oranlar, farktan kaynaklanan çatlamayı önlemek için uygulanır. Tuğlaların yüzeyi ve çekirdeği arasındaki büzülme oranları içinde dehidrasyon aşaması, karbonlu maddeler ve bazı tuğla içindeki diğer hidratlar ayrıştırılacak ve uzaklaştırılacaktır. Kademeli sıcaklık artış oranları bu aşamada hala kullanılmaktadır. Çünkü hızlı artış oranı tuğlaların şişmesine neden olabilir. Oksidasyon faz ve metal kalıntılarının oksitlenmesi, karbonlu kalıntıların daha fazla yakılmasını içerir. Kaliteli tuğla üretimi yüksek sıcaklık gereklidir. Bunu başarmak için aşırı oksijen bu aşamada yanma odasına sağlanacaktır. Sonraki aşaması, bu yana en önemli aşama olan vitrifikasyondur ve doğrudan tuğlaların mukavemet gelişimi ile ilgilidir. Ne zaman ateşleme sıcaklığı 900 °C 'nin üzerindeyse, sinterleme işlemi başlar. Bu işlem, kısmi katı parçacıkları sıvıya dönüştürür, sıvı katılaşacak sıcaklık düştükçe, katı parçacıkları bağlayan cam olarak oluşturur. Pişmiş tuğlaların gücünün geliştiği yer burasıdır. Son iki aşama yanıp sönme ve soğumadır. Yanıp sönme aşaması tepe sıcaklığından etkilenen nihai ürünün rengiyle ve karşılık gelen tutma süresi ile ilgilidir. Tuğlalar nihayet en yüksek sıcaklıktan sonra ortam sıcaklığına kademeli bir soğutma periyodundan geçerek üretilir (Zhang ve ark. 2018).

### **1.3. Bims Blok**

Bims, volkanik patlamanın oluşunu takip eden hızlı bir soğuma neticesinde yapısında bulunan gazların buharlaşması ile meydana gelen oldukça hafif yapıdaki bir malzemedir. Gözenekli yapıda, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, ısı ve ses yalıtım özelliği sağlayan, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, camsı yapıya yapıya sahip bir kayadır. Meydana geliş sırasında yapısındaki gazların bünyesini hızlı bir şekilde terk etmesi nedeniyle çeşitli ölçeklerde birçok gözenek bulundurur. Gözeneklerin arası genellikle bağlantısız ve boşluklu olduğundan geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir (DPT, 2001).

### **1.4. Gaz beton**

TS 453 "Gazbeton ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları Standardı", gazbeton ve köpük betonu birlikte ele alarak tanımlamıştır. İnce öğütülmüş silisli bir agrega ve inorganik bir bağlayıcı madde (kireç/çimento) ile hazırlanan karışımın gözenek oluşturucu bir madde ilavesi ile hafifletilmesi ve buhar kürüyle sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli hafif beton olarak tanımlanmaktadır (TS 453, 1989). Gazbeton, hafifletilmiş yapı elemanları üretmek için geliştirilmiş teknoloji ile elde edilen bir malzemedir. Bir başka tanımıyla; kum, çimento, sönmemiş kireç, çok düşük konsantrasyonda alçıtaşı ve su karışımına gözenek oluşturucu alüminyum ilave edilmesiyle elde edilir. Milimetrik olarak kesilerek otoklavlarda nihai kristal yapısına ulaşan Gazbeton bu gözenekli yapısı sayesinde iyi ısı yalıtımını sağlayan, hafif, yeterli basınç dayanımına sahip, yangına ve depreme dayanıklı hafif beton grubuna giren bir

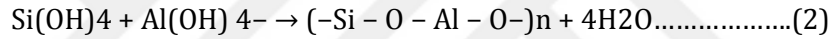
yapı malzemesidir (Kömürlü, Önel 2007). Gazbeton'un endüstrileşmiş üretiminde, genellikle silisli agrega olarak silisce zengin olan kum, kuvarsit veya uçucu kül, gözenek oluşturucu olarak ise alüminyum tozu veya macunu kullanılmaktadır. Bünyesi yapay olarak hava kanalları ile hafifletilmiş bu beton, 0,5 ile 1,5 mm arası yuvarlak birbirleri ile bağlantısı olmayan hava gözeneklerinden oluşur. G25 sınıfı malzemede gözenek hacmi % 80, katı madde hacmi % 20'dir. Bu özelliği gazbetona yüksek ısı geçirmezlik kabiliyeti kazandırır. Katı madde miktarı gözenek oranı, birim ağırlığı ve mukavemeti yüksek ısı geçirmezliği etkiler. Üretim sırasında bu oran kabartıcı madde miktarı ile ayarlanır.



## 2. BÖLÜM

### ALÜMİNA SİLİKAT KAYNAKLARI

Geopolimerizasyon toz haline getirilmiş bir alüminasilikat kaynağı ile yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltiler (sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi) arasındaki ekzotermik reaksiyondan kaynaklanır. Geopolimer üretimi için yaygın olarak kullanılan malzemeler, büyük miktarda silika ve alümina içeren uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve metakaolindir. Kaynak malzemelerdeki alüminyum miktarı, sertleşme süresini kontrol eder ve silisyum dioksit ve alüminyum oksit oranı, daha sonraki aşamalarda mukavemet oranını kontrol eder. Uçucu kül, ÖYFC, metakaolin ve füme silika gibi alüminosilikat tozunun alkali çözeltilerde çözünmesi, siyalat monomerinin (Si-O-Al-O) oluşumuna yol açar. Çözünme sırasında, serbest tetrahedral silikon dioksit ve alüminyum oksit birimleri bir oksijen atomunu paylaşarak bağlanır. Bu işlem sırasında açığa çıkan su, karışımın çalışmasından sorumludur (Parathi ve ark. 2021).



#### 2.1. Metodoloji

Geopolimerlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleriyle ilgili birçok araştırmacı tarafından daha önce birçok araştırma yapılmıştır. İlk olarak, geopolimerler kaynak malzemeye göre sınıflandırılmış, mukavemet özellikleri belirlenmiş ve farklı kaynak malzemelerin karışımının etkisi ve bunun mukavemet özelliklerine etkileri incelenmiştir. Geopolimer için kaynak malzemeler silika ve alümina açısından zengindir. Bunlar arasında uçucu kül, ÖYFC, metakaolin, silika dumanı vb. Sindhunata'ya (2006) göre, silika ve alümina oksitleri içeren herhangi bir materyal inorganik polimerik bağlayıcı malzeme geliştirmek için uygun şekilde formüle edilmiş bir alkali çözelti ile aktive edilebilir.

#### 2.2. Uçucu Kül

Uçucu kül sınıfı C (Yüksek kalsiyum) kalsiyum alümina silikat camı, serbest kireç, kalsiyum sülfat içerirken, F sınıfı (Düşük kalsiyum) yüksek oranda silika içerikli silikat camı ve mullit, manyetit ve kuvarsın kristal fazlarını içerir. F sınıfı uçucu kül kullanılarak yapılan GPC'nin yüksek mukavemetin yanı sıra yüksek dayanıklılığa da sahip olduğu bulundu. Yüksek kalsiyum, polimerizasyona ve mikroyapısal özelliklere müdahale eder. C sınıfına kıyasla F uçucu külünde mukavemet kazanma süreci yavaştır (Meesala ve ark. 2020).

### **2.3. Ögütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)**

ÖYFC, çelik-demir endüstrilerinin bir yan ürünüdür. ÖYFC'un betona eklenmesinin yüksek işlenebilirlik, basınç dayanımı ve dayanıklılık gibi birçok avantajı vardır. Sodyum alkali solüsyonu ile 27-36 MPa basınç dayanımı ve 560 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcı içeriği ile ÖYFC kullanan GPC.

Bağlayıcı içeriği 500 kg/m<sup>3</sup> ile sınırlandırıldığında maksimum mukavemetin (61 MPa) elde edildiği ve bunun ötesinde basınç mukavemetinin azaldığı gösterilmiştir. Ortam ve ısıyla kütleme altında ÖYFC'un uygun değer yüzdesi sırasıyla % 100 ve % 20 olarak gerçekleşmektedir (Ganesh and Muthukannan 2021).

### **2.4. Metakaolin**

Metakaolin, kontrollü koşullar altında kalsine edilmiş bir tür rafine kaolin kilidir. Metakaolin saf alümina silikat polimeri oluşturur. Metakaolin bazlı geopolimerler, sıradan Portland çimentosu (OPC) betonuna kıyasla yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahiptir. Metakaolinin kimyasal bileşenleri, GP'nin mekanik özelliklerini, alkali çözeltisinin konsantrasyonunu ve kütleme koşulunun sıcaklığını doğrudan etkiler. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitin bir kombinasyonu, tek başına sodyum hidroksitten daha fazla güç vermek için metakaolin'i aktive edebilir. Sodyum silikattaki silikat moleküllerinin, sodyum silikatın sodyum hidroksitten daha fazla mukavemet sağlayabildiği sodyum hidroksit aktivatörüne göre geopolimerizasyon işlemine aktif olarak katıldığı açıklandı (Alonso and Palomo 2001).

#### **2.4.1 Metakaolin geopolimerlerin oluşumu**

Metakaolin geopolimerizasyonu süreci, son yirmi yılda çeşitli deneysel ve modelleme teknikleri ile incelenmiştir. Geopolimerizasyonun doğrudan yerinde gözlemlenmesi, çeşitli faktörlerin bir kombinasyonu nedeniyle zordur. Ancak süreç kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Metakaolin yapısına alkalın saldırısı, silikat ve alüminat türlerinin çözeltiye salınmasıyla sonuçlanır, çözünme sürecinde 5 ve 6 koordineli Al, 4-koordinasyona dönüşür. (Al'ın ilk salınımının Si'ninkinden daha hızlı olabileceği öne sürülmüştür) ve bu, Si katmanlarına kıyasla metakaolin içindeki Al katmanlarındaki ilave kafes gerilimi dikkate alınarak mantıklı bir hale getirilebilir. NMR verilerinin modellenmesi, olgunlaşmış geopolimer yapısı içinde kısmen alüminyumdan arındırılmış kalıntı metakaolin parçacıklarının varlığıyla uyumlu sonuçlar üretir (Granizo ve ark. 2007).

Küçük çözünmüş türler arasındaki ve ayrıca başlangıçta aktive edici çözelti tarafından sağlanan herhangi bir silikatu içeren etkileşimler, alüminosilikat oligomerlerinin oluşumuna

yol açar. Çözünme, çözünmüş alüminat konsantrasyonunun, silikat çözeltisini kararsız hale getirmek için yeterince yüksek olduğu noktaya kadar ilerler ve çözünmüş türlerin bir jel oluşturmak üzere çökeltilmesi başlar. Bu adım ayrıca mekanik bozulma (kesme veya ultrasonikasyon) gibi faktörlerden ve çekirdeklenme bölgeleri sağlayabilen ilave parçacık yüzeylerinin (agregalar ve diğer eklenen oksitler) varlığından da etkilenecektir. Ayrıca, jelleşme meydana gelirken çözünmede devam eder; bu, jelin parçacık yüzeyleri üzerindeki kaplamasının, kütle taşınımını engelleyerek çözünme sürecini etkileyeceği anlamına gelir. Bu, basit liç testlerinin metakaolinin çözünme kinetiğini tam olarak anlaşılamamasının başlıca nedenidir; çözünmüş türlerin yeniden çökeltilmesi, bu tür deneyleri ciddi şekilde karmaşıktır.

Geopolimer jel, reaksiyona giren bulamacın katıldığı noktaya kadar büyür. Bunun için geçen süre, büyük ölçüde karışım tasarımına ve kürlenme sıcaklığına ve ayrıca kirliliklerin varlığına bağlıdır. Sertleşme, karışım tasarımına ve kürlenme ortamına bağlı olarak neredeyse anında olabilir veya birkaç gün sürebilir. Reaksiyon prosesleri, süregelen mukavemet gelişiminden ve ayrıca bazı numunelerde X-ışını ile gözlemlenebilir zeolitik kristalitlerin büyümesinden de anlaşılacağı gibi, aslında, sertleşme noktasından sonra oldukça uzun bir süre devam eder (Živica ve ark., 2011).

## **2.5. Silis Dumanı (Füme Silika)**

Füme silika, silikon ve ferrosilikon alaşım endüstrilerinin yan ürünüdür. Küresel şekli nedeniyle, betona füme silika eklenmesi yoğunluğunu ve işlenebilirliğini artırır. Sodyum silikatın aktivasyonu ile silis dumanı sentez sırasında dihidrojen oluşturabilir ve bu numunelerin kimyasının ve gözenekliliğinin değiştirilmesine neden olabilir. Oda kürlenme koşullarında dumanlı silika ile hızlı sertleşen geopolimerler hızlı sertleşir. Atık yönetimi, GPC'de dumanlı silika kullanılarak etkili bir şekilde yapılabilir. % 20-30 oranında silis dumanı eklenmesi, geopolimer betonun mekanik performansını iyileştirebilir (Khater HM 2013).

## **2.6. Pomza**

Ülkemiz, birçok endüstriyel hammadde ve yeraltı kaynakları yönünden önemli bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte resmi olarak elde edilen verilere göre, dünya pomza rezervlerinin önemli bir miktarına sahip olan ülkemiz açısından, pomza madeni potansiyelimiz de çok önemli bir yer tutmaktadır. Bugün ülkemizde işletilen pomza sahaları açısından İç Anadolu Bölgesi başı çekmekle birlikte, Akdeniz ve Doğu Anadolu bölgelerinde de önemli miktarda üretim faaliyetleri yapılmaktadır. Pomza (ponza) terimi İtalyanca bir sözcüktür. Farklı dillerde değişik adlandırmaları vardır. Örneğin Almancada (iri tanelisine) Bims, (ince tanelisine) Bimstein, Fransızcada Ponce, İngilizcede (iri tanelisine) Pumice, (ince

tanelisine) Pumicite, denilmektedir. Türkçede ise süngertaşı, köpüktaşı, nasırtası, hısırtası, küvek, kisir gibi pek çok adla anılmaktadır (Özkan ve ark., 2001).

### **2.6.1 Pomzanın oluşumu ve özellikleri**

Volkanizma faaliyetleri esnasında, yüksek sıcaklık ve basınç altında eriyik haldeki magma, şiddetli olarak yeryüzünden atmosferin üst katmanlarına doğru püskürür. Likit haldeki kızgın eriyikler atmosferin üst katmanlarında ani olarak soğuk ortamla karşılaşır. Bu soğuma neticesinde piroklastik kayaç bünyesindeki su buharı ve fümeroller akabinde bünyeden uzaklaşarak, kristalleşmeye fırsat bulamayan çok süngerimsi bir kayaç oluşur. Bu süngerimsi kayaç havadan akma mekanizması ile aktif volkan krateri ve civarında mevcut topografya üzerine birikir. Pomza, oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Bu gözenekler hacmin yaklaşık % 70-80'ini oluşturur. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan, geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Pomza birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görümlü, silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle  $1 \text{ g/cm}^3$ 'den küçük, sertliği Mohs Skalası'na göre yaklaşık 6,0 olan ve camsı doku gösteren volkanik doğal hafif bir kayadır (Gündüz ve ark., 2001; Rittmann, 1976).

### **2.6.2. Pomza reaktivitesi**

Bu incelemenin odak noktası, geopolimerlerin başlangıç malzemesi olarak pomzadır. Pomza esas olarak amorf, ancak kuvars, mullit, demir oksitler, kireç ve periklaz gibi bazı kristal fazları da içerir. Alkali bir ortamda reaktivitesi, camsı (amorf) fazın içeriği ve bileşimi ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Daha yüksek vitreus fazı içeriği daha hızlı aktivasyon ve daha yüksek derecede reaktivite ile sonuçlanır. Bununla birlikte, reaktif fazın tamamen külün amorf fazıyla ilişkili olmadığı da not edilmelidir. Örneğin, bazı refrakter fazlar reaktif değildir ancak aynı zamanda uçucu kül amorf fazının bir parçası olarak kabul edilir. Kristalli bileşenler tipik olarak reaktif değildir. Reaktif  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miktarı kadar, kütlece %40 ila %50 arasında bir reaktif silika içeriği de çok önemlidir (Okada ve ark., 2009). Bununla birlikte, bu içerik oldukça değişken olabilir, çünkü uçucu külün bileşimi ve amorf ve kristal fazlar arasındaki oran da çok değişkendir. Geopolimer tasarımı için uçucu külün potansiyel reaktivitesi ile ilgili yeni bir araştırma (Davidovits, 1988), 80 °C'de 10 M NaOH içinde uçucu kül çözünmesini ve kalıntının HCl çözeltisi ile işlenmesini birleştirerek, reaktif Si/Al molar oranının toplam miktarının değişebileceğini göstermiştir. Sonuçların çözünme süresi veya çözelti alkalinitesine önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, amorf bileşenler arasında, XRD-amorf yapılarına rağmen reaktif olmayan refrakter fazlar bulunabilir.

### 2.6.3. Si/Al oranı

Reaktif silika ve alümina oranı, geopolimerizasyon reaksiyonlarında en önemli rollerden birini oynar (Davidovits, 1988). Si/Al oranı, geopolimerlerin termal genişmesini belirler. Silika açısından zengin ikincil fazların şişmesi nedeniyle artan Si/Al ile daha düşük bir termal stabilite gözlemlenir (Gao ve ark., 2020). Reaktif Si/Al molar oranının artırılması daha fazla genişmesine ve daha düşük termal stabilitesine ve ayrıca yangına maruz kaldıktan sonra artık basınç dayanımının azalmasına neden olur ve yüksek sıcaklık işlemlerinde şişmesi muhtemeldir ve mukavemet kaybına neden olur.

### 2.6.4. Suyun rolü

Geopolimerlerin özellikleri, ilk çözeltideki su miktarı ve küçük çerçeve gözeneklerinde hapsedilmiş gibi kalan suyun içeriği ve türü tarafından güçlü bir şekilde belirlenir. Bazı araştırmacılar su içeriğinin mikroyapı ve mukavemet gelişimi üzerinde geopolimer jelin kimyasal bileşiminden daha fazla etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Su, uçucu kül parçacıklarını çözen ve  $Al^{3+}$  ve  $Si^{4+}$  iyonlarını hidrolize eden  $OH^-$  anyonlarının ortamıdır. Hammaddede çözünmesini ve reaksiyon hızını etkileyen geopolimerik jel oluşumunu başlatmak için yüksek alkalinite gereklidir. Geopolimerizasyon reaksiyonundan sonra su, fiziksel olarak bağlı su olarak gözeneklerde kalır veya geopolimer ağına kimyasal olarak dahil olur. Yüksek  $H_2O$  içeriği, daha büyük gözenekler oluşturarak ve gözenek hacmini artırarak daha düşük mukavemete neden olur ve bu da yüksek sıcaklıklarda meydana gelen büzülme arttırır (Duxson ve ark., 2007, Kriven ve ark., 2004). Bununla birlikte, su, taşınmalarını/hareketleri arttırır ve hızlandıran ayrışmayı sağlayarak iyonların etkileşimini azaltır. Ayrıca, iyonlar daha hareketli hale geldiğinde çözeltideki iyon konsantrasyonunda bir artış görülebilir. Böylece,  $OH^-$  iyon konsantrasyonu sistemde yeterince yüksekse, daha fazla su çözünme ve hidroliz reaksiyonlarının hızını arttırabilir.

## 2.7. Geopolimer Tuğlalar

Geopolimer tuğla üretimi ilk kez 1982 yılında düşük ısıli geopolimer prizi yöntemi ile lateritik diye de adlandırılan kırmızı kil topraktan üretilmiş ve Fransa'da patentlenmiştir (Davidovits, J.1976, Davidovits, J. 1988). Ağırlıkça % 5 alkali soda ( $NaOH$ ,  $KOH$ ) ve kırmızı toprağın  $70\text{ }^{\circ}C$  civarında bir sıcaklıkta sentezlenmesiyle üretilen geopolimer tuğlanın basınç dayanımı,  $900\text{ }^{\circ}C$  ısıli işlemle üretilen seramik kil tuğlaların basınç dayanımından daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca geopolimer lateritik tuğlanın mikromoleküler yapısının suyu tutma özelliği bina içerisinde nem oluşumunu önlemekte ve serinlik sağlamaktadır. Düşük sıcaklık geopolimer oluşumunda alkali tuz ( $NaOH$ ) oranı %1-5 arasında ve  $85\text{ }^{\circ}C$  ısıli işlem sıcaklığında 6-18 MPa arası dayanımlar elde edilirken, ısıli işlem sıcaklığı  $450\text{ }^{\circ}C$  olduğunda basınç dayanımı 60

MPa'a çıkmıştır. Geopolimer tuğla üretiminde NaOH veya KOH ile aktifleştirilmiş kil esaslı hammadde preslenir. Alkali soda seramik sentezinde ısıl rötrenin (çatlak) önüne geçmekte böylece üretilecek malzemede çatlak ve porozite oluşmamaktadır. Davidovits'e göre geopolimer tuğla üretimi, modern teknolojik pişirilmiş tuğla üretimine göre 2/5 düzeyinde bir enerji verimliliği sağlanmaktadır. Geopolimer tuğla üretim örneklerinden biri de yangın dayanımı yüksek dekoratif modern seramik geopolimer tuğlalardır. Geopoly-therm ticari ismi ile Cordi tarafından patentlendirilmiş kaplama seramikleri refrakter olarak kullanıldığı gibi yüksek ısı ve ışığa maruz kalan dekoratif yüzeylerde de kullanılmıştır. 1400 °C sıcaklığa dayanan bu malzeme 80-90 °C sentezlendikten sonra yüzeyinde sırlama işlemi için 1120 °C sıcaklık uygulanmaktadır (Zeybek, O. 2009). Mikromoleküler yapının nefelin ve albit çerçeve yapısına yaklaştığı köpük kil tuğla üretimi ile yüksek ısıda fırınlanarak köpüklenen kil içerisine metakaolinit esaslı polisialat geopolimer ilave edilerek 950 °C de fırınlanmış kilin basınç dayanımı 20 MPa'dan 90 MPa'a çıkmıştır. Elde edilen ürün yüksek boşluklu, düşük yoğunluklu ve yüksek basınç dayanımındadır (Buchwald, A. H. 2004).

### **2.7.1 Geopolimer tuğlada aranan özellikler**

Farklı endüstri dallarında kullanıla gelmiş, değişik karakteristik özellikler sergileyen gözenekli ve hafif doğal kayalar, bugün özellikle inşaat sektöründe hafif yapı elemanı olarak, birçok alanda değerlendirilmektedir. Geliştirilen farklı şekil ve geometrilerdeki blok malzemelerin kullanım yeri özelliklerine bağımlı olarak bir dizi, teknik parametreleri sağlaması ve standartlara uygunluğu kaçınılmaz olmaktadır. Bu irdemelerin sağlıklı olarak yapılabilmesi amacıyla, bir dizi deneysel çalışmaların bu ürünler üzerinde yapılması, kalite faktör tanımlamaları ve standart olarak ele alınabilecek temel değerlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yapı malzemesi olarak elde edilen karışımların, tüm teknik detay analizleri yapılarak, mekanik parametreleri ayrıntılı olarak tanımlanmalıdır. Malzemenin yük altında, zamanla kırılması sürecinde, pratik olarak irdelenebilecek bir dizi teorik ve istatistiksel ifadelerin geliştirilmesi gerekmektedir. İnşaat sektöründe doğal ve hafif malzeme kullanımının, binaların duyarlılığı açısından büyük önem taşımaya paralel olarak, yapı endüstrisinde ısı ve ses yalıtımı bakımından da yüksek değerlere sahip, gözenekli ve hafif doğal kayaların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak, bu malzemeler ile elde edilen yapı elemanlarının teknik açıdan irdemelerinde, malzeme teknolojisi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, kaçınılmaz olmaktadır. Kullanılan hammaddenin kayaç özellikleri, elde edilen ürünlerin kalitesine doğrudan etki ettiğinden dolayı, bu malzemeler üzerine yapılacak olan incelemeler, analizlerin bel kemiğini oluşturmaktadır. Bu bakımdan, kayaç karakteristiğinin ürün özelliklerine etkisi detay olarak analiz edilmeli ve ürün kalitesine etki eden kayaç parametreleri tanımlanmalıdır. Doğal gözenekli değişik yapıda agrega içeren beton türleri, özellikle birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların arasında kullanım açısından en yaygın olanları, pomza, volkan külü agregası, genleşmiş perlit, volkanik

cüruf, diatomit, vermikülit vb. doğal kayalardır. Bu kayalar, inşaat endüstrisinde doğal hafif agrega olarak değerlendirilmektedir. Tüm gözenekli agregaların taşıdığı kendine has yapısal özellik farklılığı, bu agregalardan elde edilmiş hafif betonların özelliklerine de yansımaktadır. Hafif yapı malzemesi, agregaların gözenekli olmasına bağlı olarak, birçok olumlu özellikler görülebilmektedir. Hafif yapı malzemesi kullanıldığı tüm yerlerde, mühendislik parametreleri olarak şu değişken değerler detay olarak irdelenmelidir.

- Basma dayanımı,
- Kuru birim hacim ağırlık değeri,
- Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi,
- Çekme dayanımı ve çatlak gelişim mekanizması,
- İy yapı ve matris bağ özellikleri,
- Sünme ve çekme davranışı,
- Değişken çevre koşullarına dayanım,
- Termik etkiler ve ısı iletkenliği,
- Akustik etkiler ve ses yalıtımı,
- Ateşe dayanım.

İnşaat sektöründe son yıllarda görülen büyük ivmelenme, kullanılacak yapı malzemelerinin teknik yönden üstün parametre ve değerlere sahip olmalarının gerekliliği, birçok yeni yapı malzemelerinin kullanımına ve uygulanmasına zemin hazırlamaktadır. Beton sektöründe hafif agrega kullanımının önemi, ülkemizde yaşanan elim deprem olayları sonucu daha da iyi anlaşılma başlanmış, çoğu beton üreticisi hafif ve doğal malzemelerin beton endüstrisinde farklı amaçlarla kullanımı üzerine Ar-Ge çalışmalarına başlamıştır. Ülkemizde hafif ve doğal agrega olarak kullanılacak malzemeler arasında, farklı yörelerde bulunan pomza oluşumları, volkanik cüruf oluşumları, diatomit ve perlit oluşumlarını sayabilmek mümkündür. Ancak, bu doğal yapıya sahip kayaların, mühendislik açısından ve endüstriyel anlamda yukarıda bahsedilen özellikleri sağlaması gerekmektedir. Bu bakımdan, ilgili TS ve ASTM standartlarında öngörülen prensipler çerçevesinde, bu tür malzemeler üzerinde bir seri deneysel analiz çalışmaları yapılarak, sektörel olarak kullanılabilirlik kriterlerinin tanımlanması ve yorumlanması gerekmektedir. Son yıllarda teknik üstünlükleri ve avantajları sebebiyle geniş bir kullanım alanı bulmaya başlayan pomzadan yapılmış hafif yapı elemanlarının farklı formlardaki ürünleri, inşaatlarda duvar dolgu elemanı olarak değerlendirilmektedir. Pomza, aynı zamanda fiziksel, kimyasal ve yapısal özelliği itibarıyla, inşaat sektöründe kullanılan doğal hafif agrega sınıfına girmektedir. Bilindiği gibi, inşaat edilen konutlarda kullanılan malzemenin hafifliği, binanın ölü ağırlığının düşük bir değerde

olmasına doğrudan etki eden bir faktördür. Bina statığı açısından, bina ölü ağırlığının mühendislik parametrelerinden belirli sınır değerleri korumak koşulu ile düşürülmeye çalışılması, binanın olası gelebilecek şok darbelere ve titreşimlere karşı daha duyarlı olmasını sağlamaktadır. Bu bakımdan, inşaat sektöründe kullanılan, hafif agregaların önemi giderek artmaktadır (Gündüz ve Ark., 1998).



## 3. BÖLÜM

### GEOPOLİMERİZASYON

#### 3.1. Geopolimer Teknoloji

Geopolimerler ilk 1950'lerde 'toprak çimento' olarak Ukrayna 'da keşfedildi (Glukhovsky, V.D. 1994), daha sonra Fransa 'da yaklaşık 30 yılı aşkın süredir J. Davidovits tarafından çalışılmıştır (Davidovits, J.1976, Davidovits, J. 1988, Davidovits, J. and Chromine, D.C. 1988, Davidovits, J., Davidovits, N., Davidovits, M. 1992, Davidovits, J., Davidovits, M., Davidovits, N. 1998. Davidovits, J. 1992, Davidovits, J.1991). Son yıllarda birkaç diğer araştırmacı, Van Deventer ve arkadaşları (Xu ve ark. 2021) (Barbosa ve ark., 2000), Balaguru ve arkadaşları (Layon ve ark., 1996), Gauckler ve arkadaşları (Förster ve ark., 1995), Hos ve arkadaşları (Hos ve ark 2002), Rahier ve arkadaşları (Rahier ve ark, 1996-2002), Comrie ve arkadaşları (Comrie ve ark., 1998-2003) ve Kriven ve arkadaşları (Rill ve ark.,2010, Glad ve ark., 2012., Comrie ve ark., 2003, Kriven ve ark., 2003, Kriven ve ark., 2007, Musil ve ark., 2012, Bell ve ark., 2007, Bell ve ark., 2008, Bell ve ark., 2008, Bell ve ark., 2008, Bell ve ark., 2009, Rüscher ve ark., 2010, Glad ve ark., 2012, Lowry ve ark., 2010) tarafından çalışılmıştır.

#### 3.2. Geopolimerleşme

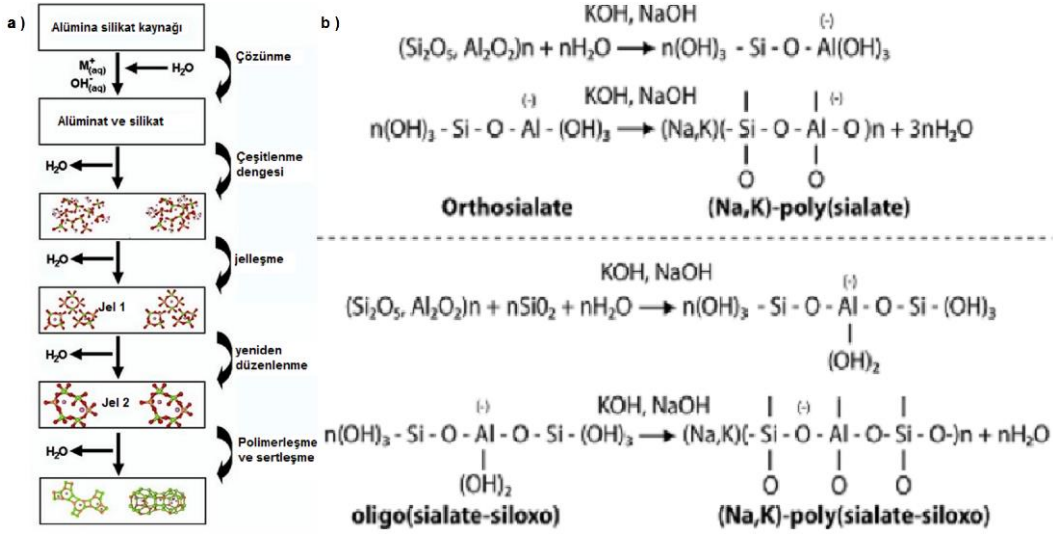
Geopolimerleşme aşağıdaki üç aşamada gerçekleşen bir ekzotermik kimyasal işlemidir (Duxson ve ark., 2007, Kriven ve ark., 2004) Alümina silikatın yüksek yakıcı ortamda çözünmesi

- (i) Bir su yardımı ile taşınımı
- (ii) Çapraz-bağlı üç boyutlu amorf bir yapı içerisinde çoklu yoğuşma

Şekil 3.1 'de geopolimerleşmenin oldukça basit bir reaksiyon mekanizmasını göstermektedir. Burada gösterilen reaksiyon mekanizması, katı alümina silikat kaynağının sentetik alkali alümina silikatlara dönüşümü sırasında meydana gelen olayların ana hatlarıdır. Ham maddenin ince öğütülmesi ısıl işlem vb. potansiyel bir gereksinimdir. Doğrusal bir sıra halinde gösterilmesine rağmen bu işlemler, büyük ölçüde bağdaşık ve eş zamanlı olarak gerçekleşir (Duxson ve ark., 2007). Katı alümina silikat kaynağının alkali bir hidroliz (su) ile çözünmesi alüminat ve silikat türetilmesine neden olur. Alümina silikatın çözünme ve ayrışma alanlarında ulaşılan veri hacimleri kendi içerisinde bilimsel çabaların bütün alanını gösterir. Çözelti içerisinde alüminat ve silikatın açığa çıkması ile sonuçlanan yüzeylerde katı parçacıkların çözünmesi (büyük olasılıkla monomerik biçimde), geopolimerleşme sırasında mekanizmanın katı parçacıkların dönüşümü temsil ettiği farz edilir. Bu kabul Şekil 2'de

gösterilen literatüre dayalı bilimsel başarımların hemen hemen temelidir. Buna rağmen GP sentezi sırasında parçacıkların jelle dönüşmesindeki gerçek süreç yüksek alkalın ve zayıf çözünme şartlarda doğrulanamamıştır. Katı parçacıkların dönüşümündeki kesin mekanik olay anlaşılmadan, yüzey çözünmesi burada tanımlanan basitleştirilmiş bir model olarak düşünülecek. Çözünme ile çözeltide açığa çıkan çeşitlenmeler aktive olmuş çözeltide zaten var olan sulu fazın içerisine dâhil olurlar. Silikat ve alüminatların karmaşık karışımı ve dolayısı ile alümina silikat çeşitlenmeler oluşur ve bu çözeltilerdeki çeşitlenme dengesi yaygın olarak çalışılmaktadır (Swaadle T.W. 2001). Yüksek pH 'de amorf alümina silikatların çözünmesi hızlıdır ve bu hız süper çözünmüş alümina silikat çözelti oluşturur. Bu, yoğunlaştırılmış çözelti içerisinde yoğunlaşma ile sulu faz biçiminde büyük bir ağ örüntüsü şeklinde bir jelle oluşumu ile sonuçlanır. Bu işlem çözünme sırasında sözde nominal tüketilen suyu serbest bırakır. Sanki su reaksiyon ortamı olarak rol oynar, fakat jeldeki gözeneklerin içerisinde kalır. Jel tipi yapının bu alümina silikat bağlayıcı ve suyun oluşturduğu iki- fazlı olarak adlandırılır.

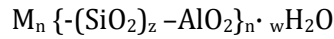
Sürekli bir jel halinde süper çözünmüş alümina silikat çözeltisi için süre önemli ölçüde ham malzeme işlem şartlarına, çözeltinin kompozisyonuna ve sentezleme şartlarına bağlı olarak değişir (Aiello ve ark., 1991). Buna rağmen bazı sistemler jel değildir. Bu sistemler tipik olarak seyreltidedir ve çözölmüş silisyum ve alüminyumun konsantrasyonu dengeden uzak sistem nedeniyle salınım gösterir (Faimon ve ark.,1996). Jelleşme sonrası yaygın olarak GP'lere atfedilen 3-boyutlu alümina silikat ile sonuçlanan jel ağlarının bağlantısı artarken sistem yeniden düzenlemeye ve organize olmaya devam eder. Bu, yakın zamanlarda deneysel gözlemlerle çoklu jel aşamaları varlığı (Fernandez-Jimenez ve ark.,2006) ve hem metakaolin hem de uçucu kül esaslı GP'lerin nümerik modellenmesi ile tutarlı olup Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 3.1 bu ardışık ve kontrollü aşamaların bir çıktısı olarak aktivasyon reaksiyonunu tanımlar. Çekirdeklenme veya alümina silikat malzemenin çözünmesi ve polimerik çeşitlenmelerin oluşumu Glukhovsky tarafından önerilen termodinamik ve kinetik parametrelere bağlıdır ve ilk iki adımı kapsar. Büyüme çekirdeğin kritik bir boyuta ulaşması sırasındaki adımdır ve kristaller oluşmaya başlar. Yapısal yeniden düzenlemelerin bu aşamaları birçok fiziksel özelliğin belirlenmesinde kritik olan malzemenin gözenek dağılımı ve mikro yapısını belirler (Duxson ve ark., 2005).



Şekil 3.1. (a) Geopolimerleşmenin kavramsal bir modeli (Duxson ve ark., 2007), (b) Davidovits'e göre geopolimerleşme mekanizmaları (Davidovits, 1991).

### 3.3. Geopolimerleşme Kimyası

GP'ler kimyasal anlamda polisialatlar olarak tasarlanırlar. Sialat silisyum-oxo-alüminat'ın bir kısaltılmışıdır. Sialat ağ örgüsü, doku arasında bulunan oksijenlerin tamamını paylaşarak değişen bir dizilimde bağlanmış  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4^-$  tetrahedrallerden oluşur. Pozitif iyonlar ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ), dört-kat koordinasyonda  $\text{Al}^{3+}$  negatif yükünü dengelemek üzere iskelet boşluklarda bulunmak zorundadır. Polisialatlar ampirik bir formüle sahiptirler (Davidovits,1991).



Burada M, sodyum, potasyum veya kalsiyum gibi bir katyondur; 'n' çoklu yoğunlaşma derecesidir ve 'z' ise 1, 2 veya 3 dür. Polisialatlar oksiyen ve dört-kat koordinasyonda  $\text{Si}^{4+}$  ve  $\text{Al}^{3+}$  ile zincir ve halka şeklinde polimerlerdir. Reaksiyon sisteminde reaksiyona giren silikat miktarı arttığında, poli-sialatların (-Si-O-Al-O-) dışında, poli-sialat-silokso (-Si-O-Al-O-Si-O-) ve poli-sialat-disilokso (-Si-O-Al-O-Si-O-) kimyasal gruplaşmalar GP'ler için muhtemel yapısal birimlerdir. GP esaslı malzemelerin bir sınıflandırılması ve muhtemel uygulamaları Tablo 3.1 'de verilmektedir. Geopolimerleşme ekzotermiktir ve Tablo 3.1 'de şematik olarak verilmektedir.

**Tablo 3.1.** Geopolimer reçinelerin sınıflandırılması ve uygulamaları

Kategori	Alkalileşme	Kullanım
Polisialat (PS)	K-PS	Isıl yalıtım
	Na-PS	Yangın dayanımı
Polisialat-silokso (PSS)	K-PSS	Refrakter
	Na-PSS	Yangın dayanımı
	K, Ca-PSS	Performans çimento ve zehir atıklar
Polisialat-silokso (PSDS)	K-PSDS	Kesici takım kompozitler
	Na-PSDS	Refrakter
	F,K, Na-PSDS	Yangın dayanımı

Reaksiyonların makro moleküler yapı üç boyutlu gerçek yapı birimleri sağlayan oligomerler (dimers veya trimers) boyunca olduğu tahmin edilmektedir. Oda sıcaklığında geopolimerik polimerleşme gerçekleştiğinde, amorf ve yarı kristal yapılar oluşur. Ancak GP'ler hidrotermal bir ortamda sentezlendiğinde ve 150 °C-180 °C aralığında sertleştiğinde geopolimerik ürünler yapıda kristaldir.

### 3.4. Geopolimer ve Zeolitlerin Karşılaştırılması

Geopolimerizasyon içeren kimya, sonuç ürünler kompozisyon ve yapı anlamında farklı olsa da zeolitlerin sentezlenme kimyasına yakındır (Gubb ve ark., 2011). Geopolimerleşme ve zeolitlerin sentezi arasındaki karşılaştırma Tablo 3. 2 'de verilmektedir.

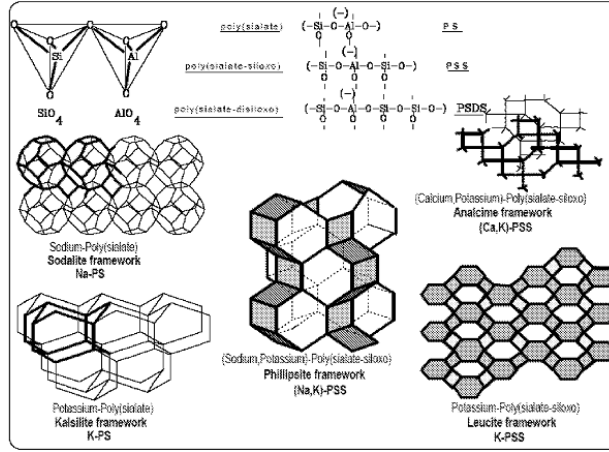
**Tablo 3. 2.** Geopolimerleşme ve zeolitlerin sentezi arasındaki karşılaştırma (Comrie ve ark., 1998).

	Zeolit sentezi	Geopolimerleşme
<b>Reaksiyona girenler</b>	Al kompleks çözeltiler +Si kompleks	Al-Si katı kaynak malzemeleri +alkali çözelti + silikatlar
<b>Reaksiyonun ilk aşaması</b>	Çözeltide çekirdeklenme	Bulamaçtan Al-Si çıkarılması
<b>Reaksiyonun son aşaması</b>	Çözeltide kristal büyümesi	Bulamaçtan çıkartılan Al ve Si'un Difüzyon ve yoğunlaşması
<b>Sıcaklık</b>	90-300 °C	Oda sıcaklığı
<b>pH</b>	6-11	14
<b>Ürün</b>	Kristal zeolit	Jel ve Al-Si katı kaynaklarının karışımı
<b>Kompozisyon</b>	Belirli bir sitoykometrik formül	Belli bir sitoykometrik kompozisyon yok
<b>Yapı</b>	Eşsiz kristal	Yarı kristal jel faz ve kristal Al-Si kaynak malzemelerinin amorf karışımı.
<b>Mekanik dayanım</b>	Düşük	Yüksek

Zeolit ürünler belirli kristal yapıda ve sitoykometrik kompozisyondadırlar. GP ürünler ise bir sitoykometrik kompozisyona sahip değildirler ve sıklıkla yarı kristal reaksiyon ürünlerinin, kalıntılar, kristal Al-Si içeren parçacıkların karışımıdır. Zeolit süreci ön çekirdeklenme, çekirdeklenme ve kristal büyümesini içerir. Buna karşın geopolimerleşme, sıra halinde, çıkarma, difüzyon, yoğuşma ve sertleşme adımları içerir.

Katı Al-Si kaynağı alkali çözelti ile temas ettiğinde, hem Al ve hem de Si çeşitlenme çıkarımları başlar. Bu çıkarımın ölçüsü alkali çözeltinin konsantrasyonuna, alkali çözeltideki alkali metal kationuna, karıştırma hızına, çıkarım periyoduna, Al-Si kaynak metallerinin kompozisyon ve yapısına bağlıdır. İfade edilen bütün bu faktörler arasında alkali çözeltinin konsantrasyonu ve Al-Si kaynak malzemelerinin özelliklerinin bu süreçte baskın olduğuna inanılmaktadır. Al ve Si çeşitlenmeler, Al-Si parçacıkların yüzeyinden çıkarılmaları sonrasında jel faza difüz ederler, Al-Si parçacık yüzeylerinde Al ve Si çeşitlenmelerin konsantrasyonunu düşürür ve bu durum Al ve Si 'un ileriki çıkarılmalarını tetikler. Difüzyon aşamasında, karıştırma şiddeti ve süre baskın faktörlerdir. Daha uzun çıkarma periyodu daha şiddetli karıştırma, Al ve Si kompleksleri yüzeyden yüksek oranda çözebilir ve kinetik olarak Al ve Si difüzyonunu hızlandırmak için Al-Si parçacık yüzeyi ile jel faz arasındaki bariyerleri kırabilir.

Geopolimerleşmede başlıca reaksiyona girenlerden biri Si kompleksleri polimerleşmeye Al-Si yüzeyinden Al çıkarıldığında alüminat ile birlikte daha fazla uyumlu hale getirecek silikat (katı veya sıvı) ilaveleridir. Bir Al-O-Si bağının oluşumunda aktivasyon enerjisi bir Si-O-Si oluşumundakinden daha düşük olduğu için Al kompleksler ve Si kompleksler arasındaki polimerleşme Si kompleksler arasındaki polimerleşme önceliğinde gerçekleşir. Bu nedenle, Al ve Si kompleksler arasında, Al-Si malzemedeki Al ve Si komplekslerin difüzyonu ve çıkarılması ile birlikte eş zamanlı bir yoğuşma meydana gelir. Al ve Si kompleksler arasında polimerleşmeyi etkileyen faktörler, geopolimerleşme sırasında Al ve Si komplekslerin yoğuşmasını etkilemektedir. Sıcaklık, pH, kationlar, zeolitlerin sentezini büyük oranda etkileyen üç faktördür. Bu üç faktörün geopolimerleşmeyi de etkilediği düşünülmektedir. Daha yüksek sıcaklık, daha yüksek pH (alkaline çözeltinin daha fazla konsantrasyonu) ve daha büyük atomik boyutta alkali metal kationları yoğuşma aşamasını tetikler ve böylece tamamlanma aşamasında geopolimerleşmeyi teşvik eder (Comrie ve ark., 2003). Geopolimerleşme de sertleşme aşaması, zeolitlerdeki kuruma ve sertleşme aşamalarından farklılık gösteren özel bir işlemdir. Zeolitlerin sentezinde sertleşme ve kuruma sırasında herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmez, sadece su buharlaşır. Ancak sertleşme sırasında parçacıkların görünür bir hareketi olmamasına rağmen, jel faz ve parçacık yüzeyleri arasında çıkarılma ve difüzyon hala gerçekleşiyor olabilir ve gözeneklerdeki bulamacın hafif bir hareketi gerçekleşebilir. Tipik bir GP iskeletin bilgisayar ile oluşturulmuş modeli Şekil 3.2 'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.2.** Polimerik Mn-(-Si-O-Al-O-)n poli(sialat) ve Mn-(-Si-O-Al-O-Si-O-)n poli(sialat-silokso) ve ilgili iskelet (Comrie, D.C., 1988).

Yukarıda detaylı geopolimerleşme mekanizmaları verilmiştir. Oluşum mekanizması oldukça kompleks olan GP'lerin standardize edilmiş bir üretim tekniği bulunmamakta, çok geniş bir kompozisyon aralığında üretilebilmekte ve bu anlamda standart bir deneysel kompozisyonları da bulunmamaktadır (Kriven, 2010).

Bölüm 2'de sunulan farklı alümina silikat kaynaklarından özellikle metakaolin kullanılarak ve Bölüm 3' de detayları verilen geopolimerik yöntem ile yapısal malzemeler üretilmektedir. Hem metakaoline alternatif hem de yerel kaynakların faydalı yapısal malzeme üretimine yönelik kullanımı açısından ülkemiz pomzası değerlendirilebilir.

### 3.5. Geopolimer Teknolojisi ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar

Oh ve arkadaşları (2014) alkali ile aktifleştirilen reaksiyon ürünlerinin çözünme özellikleri, farklı içerik ve fiziksel özelliklere sahip iki uçucu kül kullanılarak araştırdı. 5M NaOH ve sodyum silikat ile aktive edilen numuneler 60 °C'de kürlendi. Analizler sonucunda element içeriği, amorf faz içeriği ve partikül boyutunun basınç dayanımında büyük değişimlere neden olduğu gözlemlendi. Ana kristal fazlar olarak Şabazit-Na ve alüminyumca zengin Şabazit-Na bulunmuştur. 29Si MAS NMR analizi sonucunda 108 ppm Q4 Al pikinin kuvars olmadığı ve geopolimerizasyonda Si atomlarının aktif rol aldığı görülmüştür. 27Al MAS NMR spektrumunda ise Al(V) ve Al(VI) alüminyum atomlarının Al(IV) atomlarına dönüştüğü gözlemlendi.

Ma ve ark. (2013), uçucu kül, geopolimer macun elde etmek için farklı oranlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiş ve 7 ve 28 gün boyunca 40 °C'de kürlenmiştir. Geopolimerlerin gözenek yapıları ve su geçirgenlikleri araştırılmış ve portland

çimentosundan elde edilen macun ile karşılaştırılmıştır. Yüksek silisyum içeren alkali çözelti ile aktifleştirilmiş uçucu külün gözenek yapılarının, çimento kullanılarak elde edilen macundan farklı olduğu görülmüştür. Geopolimerlerin yapılarında büyük gözenekler gözlenmezken, bazı büyük boşluklar gözlemlendi. Silisyum içeriği yüksek numunelerde toplam gözeneklilik azalmıştır. 28 gün yaşlandırılan geopolimerlerin su geçirgenliğinin çimento hamurundan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Rickard ve ark. (2012) geopolimerleri hazırlamak için 5 farklı uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmıştır. Geopolimer macunlar 3 farklı Si/Al 1,65'den hazırlanmış ve 70 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Elde edilen numuneler termo-fiziksel, mekanik ve mikroyapısal açıdan incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanımları en yüksek 143 MPa ve en düşük 6 MPa'dır. Si/Al oranı yüksek uçucu kül ile elde edilen geopolimerler, yüksek basınç dayanımlarına ve 1000 °C'ye kadar geniş bir aralıkta ve 1000°C'ye kadar geniş bir aralıktadır.

Somna ve ark. (2011) 4,5 ila 16.5M arasında değişen konsantrasyonlarda öğütülmüş uçucu kül ve sodyum hidroksit. 7, 14, 28, 42 ve 60 günlük numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin mikroyapıları SEM, EDX, XRD ve FTIR analizleri ile incelenmiştir. Öğütülmüş uçucu kül kullanılarak hazırlanan geopolimer pastaların basınç dayanımının, orijinal uçucu kül kullanılarak hazırlanan numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Artan sodyum hidroksit konsantrasyonu ile basınç dayanımında bir artış gözlemlendi. NaOH konsantrasyonunun doğru oranını bulan, ham maddelerden silika ve alüminanın büyük ölçüde çözülmesini sağlayarak, geliştirilmiş mukavemete yönlendirecektir. Dolomit/uçucu kül bazlı jeopolimerdeki iyon dengesi ve çözünme işleminin gösterimini göstermektedir. Al<sup>3+</sup> ve Si<sup>4+</sup> iyonlarını serbest bırakmak için jeopolimer malzemenin çözünmesi için Na<sup>+</sup> iyonlarına ihtiyaç vardı , bu arada OH-iyonlar, jeopolimerizasyon işlemi sırasında salınan iyonla reaksiyona girer. Kiatsuda (Somna ve ark.). 4.5–16.5 M NaOH kullanılan bağımsız uçucu kül geopolimerini inceledi. Mukavemete odaklanılarak, 9,5-14,0 M NaOH konsantrasyonları ile 28 günlük 20,0–23,0 MPa basınç dayanımları elde edildi. 9,5M ve 14M konsantrasyonlarda NaOH kullanılan numunelerde en yüksek basınç dayanımlarının 23 MPa ve 25 MPa olduğu ve artan konsantrasyonla basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür.

Ryu ve ark. (2013) 3 farklı konsantrasyonda sodyum hidroksitin geopolimerlerin basınç dayanımı ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. F sınıfı uçucu kül, 6, 9 ve 12M konsantrasyonlarında sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilmiştir. Numuneler 60 °C'de 24 saat kürlendi. 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 91 günlük numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Geopolimerlerin mikroyapıları SEM, EDS, XRD, FT-IR teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Artan sodyum hidroksit konsantrasyonu ile basınç dayanımının arttığı gözlemlendi. 12M konsantrasyonda NaOH ile aktive edilen 91 günlük numune için en yüksek basınç dayanımı 47 MPa olarak bulunmuştur. Numunelerin mikroyapısını araştırmak için 28 günlük numuneler kullanıldı. SEM ve EDS analizlerinde yapıda kalan uçucu külün küresel şeklini koruduğu ve yapının çoğunlukla Si ve Al'den oluştuğu görülmüştür.

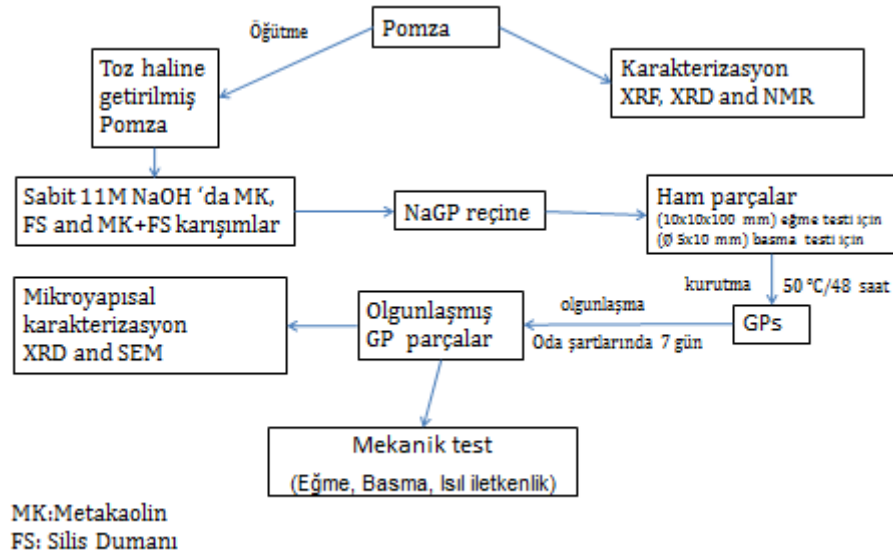
Hanjitsuwan ve ark. (2014), sodyum hidroksit konsantrasyonunun priz süresi, basınç dayanımı ve elektriksel özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sodyum hidroksit 8, 10, 12, 15 ve 18 molar olmak üzere 5 farklı konsantrasyonda kullanılmıştır. Sıvı/kül oranı 0,4, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 0,67 ve kürleme sıcaklığı 40 °C idi. Elde edilen sonuçlarda sodyum hidroksit konsantrasyonunun fiziksel ve elektriksel özellikleri büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Sodyum hidroksit konsantrasyonunun artmasıyla priz süresinde ve basınç dayanımında bir artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda hidroksit konsantrasyonu arttıkça dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri de yükselmiştir.



## 4. BÖLÜM

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Başlangıç malzemenin karakterizasyonu özellikle öğütme boyutu sonuç malzemenin fiziksel özellikleri üzerinde de önemli etkilere sahiptir (Szabó ve ark., 2017). Bu kapsamda geopolimerizasyona uygunluğunun tespiti için başlangıç malzeme karakterizasyonu ile uygun alümina silikat kaynağı belirlendikten sonra yapısal malzemenin üretimi ve sonrasında mekanik ve mikroyapısal karakterizasyonu şeklinde akış Şekil 4.1 'de verilmektedir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalar şeması

Yerel alümina silikat kaynaklarının geopolimerizasyon yöntemi ile yapısal malzemeye dönüştürülmesinin hedeflendiği bu çalışmada ilk olarak Bitlis'den ahlat taşı ve Isparta'dan pomza taşı (Pomza-1) volkanik külleri temin edilmiştir (Şekil 4.2). Temin edilen malzemeler başlangıç karakterizasyonları için kırılmış ve öğütülerek 63 mikron elekten geçirilmiştir.



Şekil 4.2. Orijinal başlangıç malzemeleri a) Ahlat taşı b) pomza taşı

#### 4.1. Başlangıç Malzeme Karakterizasyonu

##### 4.1.1. X-ışını floresan spektroskopisi (XRF)

Orijinal numunenin XRF analizi bir Shimadzu EDX-7000 (rodyum kaynağı) kullanılarak belirlenmiştir. Toz bir ultralen kaba yüklendi ve ultralen film ile kaplandı ve numune odası analizden önce He gazı ile doldurulmuştur. Kalitatif oksit bileşimi, sodyumdan uranyuma kadar elementleri kapsayan kalitatif bir tarama kullanılarak bulunmuştur, ardından ana oksit miktarları, arka plan gürültüsünü azaltmak için filtreler (potasyum ve sonraki elementler için) kullanan kantitatif bir tarama ile daha doğru bir şekilde ölçülmüştür. Isıl işlem bileşimi etkilemeyeceğinden ısı işlem görmüş numune test edilmemiştir.

##### 4.1.2. X-ışını difraksiyon analizi (XRD)

Kristallik, Cu K $\alpha$  radyasyonu (1.5418 Å dalga boyu) kullanılarak XRD (Bruker D8 Advance) ile incelenmiştir. Taramalar, 0,01°'lik bir adımda ve 0,1 s/adım'da 10° ila 80° 2 $\theta$  arasında gerçekleştirildi. Numune tutucu (bir polimetilmetakrilat (PMMA) diski), maksimum yaklaşık 2 $\theta$  =12° de geniş bir amorf arka plan üretmektedir, bundan sonra açı arttıkça sabit bir şekilde azalmaktadır.

##### 4.1.3. Nükleer manyetik rezonans analizi (NMR)

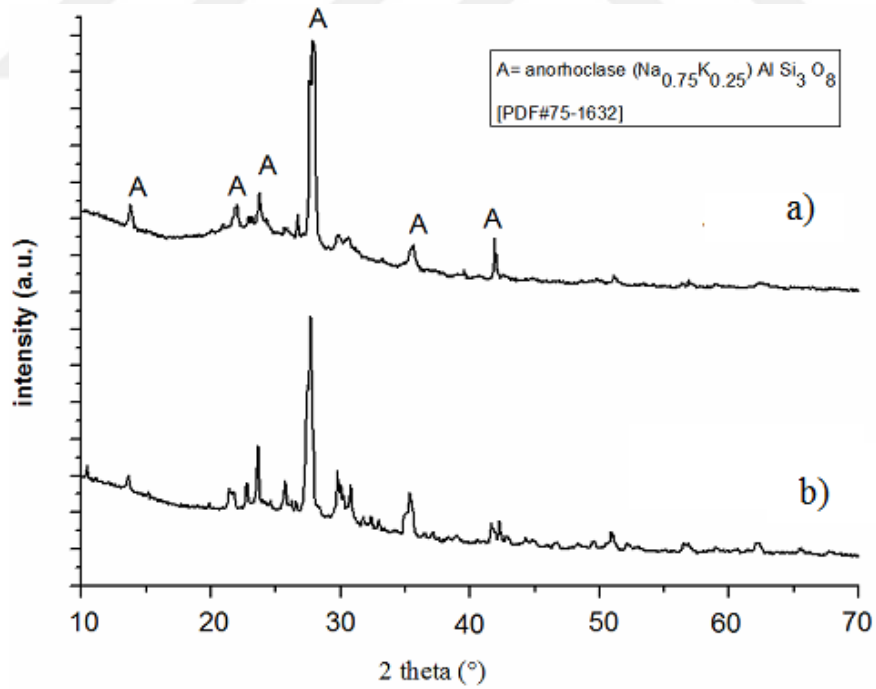
Alüminyum koordinasyonu, <sup>27</sup>Al NMR ile bir Unity Inova 300 spektrometresi (7.05 T alanı, 78.2019 MHz <sup>27</sup>Al rezonans frekansı) üzerinde, numuneler zirkonya rotorlarına paketli halde ve 10 kHz'de sihirli açılı döndürme kullanılarak belirlenmiştir. Doğrudan polarizasyon deneyleri, 5.12 ms'lik bir alım süresi, 1 sn'lik bir geri dönüşüm gecikmesi ve 0.8  $\mu$ s'lik bir darbe genişliği kullanılarak yapılmış ve toplam 4000 tarama toplanmıştır. Spektrumlar, 1 M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> sulu çözeltisine referans edilmiştir ve MestReNova yazılımı ile işlenmiştir.

## 4.2. Geopolimerizasyon Yöntemi ile Öncü Yapısal Malzeme Üretimi

Malzemelerin x-ışını floresan spektroskopisi (XRF) analizleri ile kimyasal, X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile de kristalografik analizleri yapılmıştır.

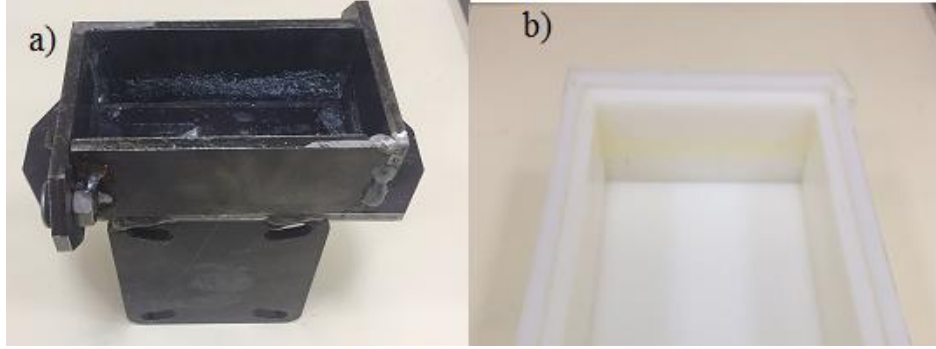
**Tablo 4.1.** Başlangıç malzemesi XRF sonuçları; a) Ahlat taşı b) pomza-1 taşı

a)			b)		
No	İçerik İsmi	Oran	No	İçerik İsmi	Oran
1	Na <sub>2</sub> O	5,51%	1	SiO <sub>2</sub>	63,15%
2	MgO	0,24%	2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,38%
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,01%	3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,33%
4	SiO <sub>2</sub>	64,11%	4	CaO	7,62%
5	K <sub>2</sub> O	4,78%	5	MgO <sub>3</sub>	2,26%
6	CaO	1,64%	6	SO <sub>3</sub>	0,06%
7	TiO <sub>2</sub>	0,44%	7	Na <sub>2</sub> O	3,27%
8	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,91%	8	K <sub>2</sub> O	0,95%



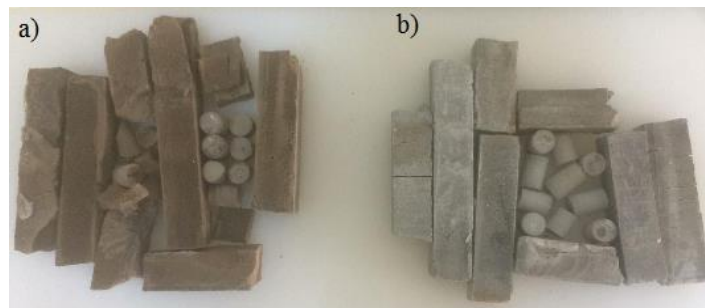
**Şekil 4.3.** Başlangıç malzemesi XRD sonuçları; a) Ahlat taşı b) pomza-1 taşı

Yapısal malzeme üretimi için ön deneylerde kullanılan ilk kalıplar aşağıdaki gibi hazırlanmıştır (Şekil 4.4). Bulamaç metal kalıba numune difüze olduğu görüldüğünden poliasetal kalıp yapılmıştır.



**Şekil 4.4.** Malzeme üretiminde kullanılan kalıplar. a) Metal kalıp b) poliasetal kalıp

Analiz sonuçlarına göre her iki malzemede büyük oranda alümina ve silika içermesine rağmen çok az amorf faz içermektedir. İyi bir geopolimerizasyon için öncelikle başlangıç malzemesi yeteri kadar amorf yapı içermelidir. Buradan hareketle malzemenin ısı işlem ile amorf hale getirilebileceği seçeneği düşünülerek Ahlat ve Pomza-1'den birer ön deneme yapılmıştır. Kimyasal içerikleri dikkate alınarak öğütülen başlangıç malzemeleri hazırlanan 5 M NaOH çözeltisi ile mekanik karıştırıcıda 500 dev/dak hızda 3 dakika ve 1000 dev/dak hızda 3 dakika olacak şekilde karıştırılmıştır. Homojenize bulamaç mekanik testler için ASTM C1424-10 standardına göre  $\varnothing$  5x10 mm basma, ASTM C78/C78M-18 standardına göre 10x10x50 mm eğme numuneleri için hazırlanan poliasetal kalıba konulmuştur. Plastik film ile sarılan kalıp etüvde 50 °C sıcaklıkta 24 saat tutularak bulamaç olgunlaştırılmıştır ve sonuç malzemeler Şekil 4.5'de verilmektedir.



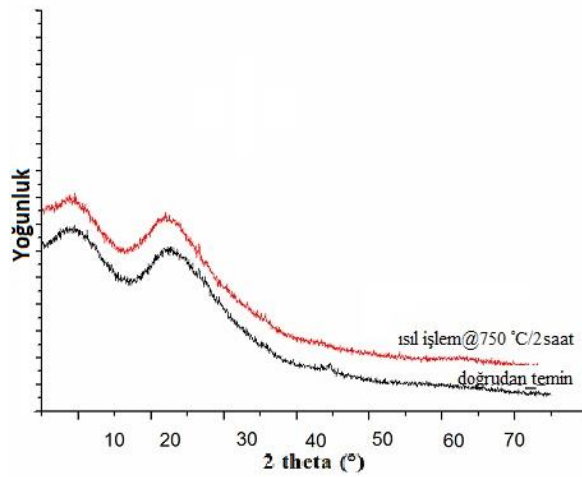
**Şekil 4.5.** Başlangıç malzeme numuneleri; a) Ahlat taşı b) Pomza taşı

Numunelerin makro görüntülerinden istenen biçimde şekillendirilmekle beraber yeteri kadar yapısal bütünlükte ve dayanımda olmadıkları ve başlangıç malzemesinin ısı işlem ile amorf hale getirilmesinin verimli olmayacağı görüldüğünden alternatif olarak farklı bir ilimizden (Nevşehir) yeni bir pomza taşı (pomza-2) temin edilmiştir. Pomza-2 malzemesinin yine XRF ve XRD ile kimyasal ve yapısal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu malzeme için sıcaklığa bağlı dönüşüm olup olmadığını görmek üzere 5 °C/ dak ısınma hızında 750 °C'de 2 saat süre ile atmosfere açık fırında ısı işleme tabi tutulmuştur. XRD analizleri yapılarak doğrudan temin edilen malzemenin XRD desenleri ile karşılaştırılmıştır. XRD sonuçlarından Pomza-2 malzemesinin ilk iki alümina silikat malzemedan farklı olarak geopolimerizasyon için yeteri kadar amorf yapıda olduğu görülmüştür (Şekil 4.6).

**Tablo 4.2.** Oksit bileşikleri açısından kantitatif tarama pomza-2 bileşimi

Oksit	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mol (%)	81.6	8.7	5.0	2.9	1.2	0.6

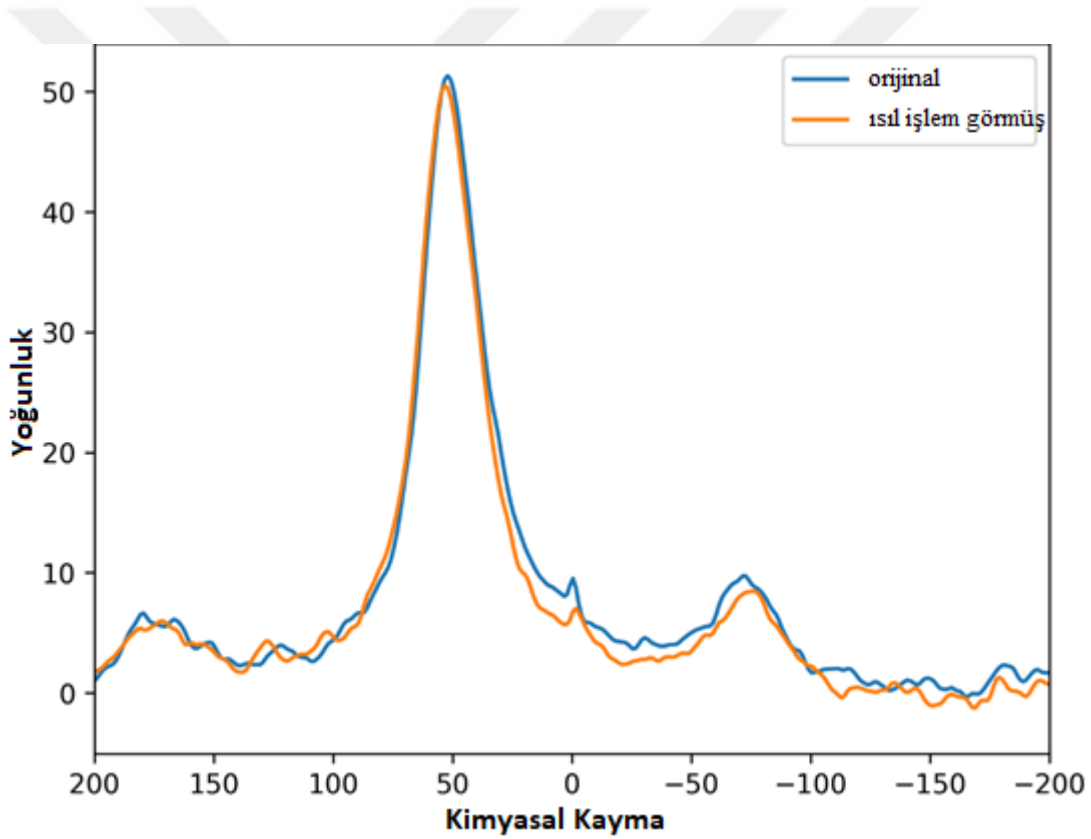
Her iki numune için X-ışını kırınımı aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.6). Numuneler, yaklaşık 22° 2θ'de merkezlenmiş geniş bir tümsek ve yaklaşık 45° 2θ'de çok küçük bir tepe üretir, bu da neredeyse tamamen amorf olduklarını gösterir. Isıl işlem görmüş numune için arka plana göre piklerde hafif bir artış vardır, ancak bunun dışında kırınım deseni orijinal numune ile aynıdır. Bu da XRF analizlerinde öngörülen ısı işlemin bileşimi ekilemeyeceği görüşünü desteklemektedir.



**Şekil 4.6.** Pomza-2 malzemesinin doğrudan ve 750 °C'de 2 saat ısı işlem sonrası XRD sonuçları

Konunun güncel olması nedeni ile literatürün takibi (Samuel ve ark., 2021) bu önceliğin yanında iyi bir reaksiyon için alüminyumun amorf yapıda Al(V) koordinasyonda olması gerektiği sonucunu ortaya koymuş ve malzeme NMR analizi ile bu bakımdan ileri karakterize edilmiştir.

Her iki numune için  $^{27}\text{Al}$  NMR spektrumları aşağıda Şekil 4.7'da gösterilmektedir. Spektrumlar, muhtemelen ısıtma sıcaklığı oldukça düşük olduğu için (200 °C) hemen hemen aynıdır. Her iki spektrumda meydana gelen yaklaşık 0 ppm'de düşük yoğunluklu tepe noktasına dayalı olarak çok az miktarda altı koordineli Al olmasına rağmen, alüminyum neredeyse tamamen dört kat koordinasyon içindedir. Geopolimerizasyon için en reaktif alüminyum koordinasyonu olan beş koordineli Al olmadığı için bu numuneler muhtemelen çok hızlı tepki vermeyecektir. Bununla birlikte, altı koordineli Al'in olmaması, yavaş olsa bile reaksiyonların meydana geleceği anlamına gelmektedir.



**Şekil 4.7.** Orijinal ve ısıtma işlemi görmüş pomza-2 numuneleri için  $^{27}\text{Al}$  NMR spektrumları. Dönen yan bantlar 175 ve -75 ppm'de görünür.

Başlangıç malzeme karakterizasyonu ile literatür özellikle kompozisyon modifikasyonu ve sonuç malzemenin ısı iletkenlik özellikleri anlamında taranmıştır. Geopolimer Si/Al oranı 1-

35 oranında üretilebilmekte ve düşük teknoloji çimentodan ileri teknoloji seramik ve kompozitlere kadar geniş bir alanda kullanılabilir (Gao ve ark., 2020). Bu çalışmada pomza taşı metakaolin yerine kullanılacaktır farklı bölgelerden alınan farklı bileşimde metakaolin ile üretilen ve takviye edilen yapısal malzemeler detaylı olarak karşılaştırılmıştır (Ribeiro ve ark., 2017). Kompozisyonlara bakıldığında ve XRF sonuçlarında da görüldüğü üzere silika/alümina oranı modifiye edilebilir veya takviye edilebilir. Kompozisyon anlamında yine 12.5 M NaOH çözeltisi kullanılmış ve bu öneride sunduğumuz 1:1:2-6:7-13 kompozisyon sınırları içerisinde (Doğan ve ark., 2021).

Geopolimerlerin ısı iletkenliği ile ilgili potansiyellerini değerlendirmek için yalıtım ürünü veya beton yapı malzemesi olarak numuneler hazırlanmıştır. Isı iletimi betona ise nispeten yüksek termal iletkenlik sergilemiştir (Subaer ve ark.2006). Metakaolin geopolimerlerinin termal iletkenliğini yaklaşık 0,53- 0,8 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> olarak ölçülmüştür (Duxson ve ark., 2006).

#### **4.3. Geopolimerizasyon Yöntemi ile Yapısal Malzeme Üretimi**

Ülkemizin farklı bölgelerinden alınan aluminosilikat malzemelerinin yukarıda sunulan karakterizasyon sonuçlarından pomza-2 malzemesinin geopolimerizasyon için yeteri kadar amorf ve NMR sonuçlarından reaksiyonu desteklemekle beraber engel olmayacağı sonucu çıkarılabildiğinden bu malzeme ile ilerlenmiştir. Başlangıç malzemelerinin karakterizasyon sonuçlarından ahlata taşı ve pomza-1 malzemelerinin geopolimerizasyon için yeterince amorf olamaması üzerine pomza-2 malzemesi ile devam edileceği belirlenmiştir. Bu nedenle pomza-2 malzemesi başlangıç malzemesi olarak detaylı karakterize edilmiş hem amorf hem de kimyasal olarak geopolimer formülüne modifiye edilebilecek durumda olduğu görülmüştür.

Pomza-2 modifiye edilerek deneysel çalışmaların üretim ve karakterizasyon anlamında tamamlanmıştır. Ayrıca erken sonuçların uluslararası bir konferansta (Bagci ve ark., 2022) sunumu sonrası sonuç malzemedeki metakaolin ilavesinin pomzanın etkin bir şekilde geopolimer reaksiyonunu güçlendirdiği kanısına varılmıştır.

Pomza-2 malzemesi kalitatif XRF taraması için öncelikle Si, Al, K, Fe, Ca ve Na'yı tanımlanmış ve kantitatif tarama sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir. Metakaolin (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) ile karşılaştırıldığında, pomza SiO<sub>2</sub> açısından çok daha zengin ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> açısından daha fakirdir. Geopolimerizasyon için pomza-2 'de bulunan Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O, herhangi bir NaOH veya KOH çözeltisini desteklerken, CaO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> düşük konsantrasyon nedeniyle anlamlı bir etkiye sahip olmamalıdır. Pomza-2 nin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> açısından zayıf olması nedeni ile metakaolin ve tipik geopolimer bileşeni olması nedeni ile silis dumanı ile değişen molar oranlarında karışımlar hazırlanmış (Tablo 4.3) ve 11 M NaOH çözeltisi ile karıştırılarak bulamaç hazırlanmıştır. 11 M NaOH çözeltisi öneride sunduğumuz 1:1:2-6:7-13 kompozisyon sınırları içerisinde (Doğan ve ark., 2021). Karıştırma işlemi mekanik karıştırıcıda 500 dev/dak hızda 3 dakika ve 1000

dev/dak hızda 3 dakika olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Homojenize bulamaç mekanik testler için ASTM C1424-10 standardına göre Ø 5x10 mm basma, ASTM C78/C78M-18 standardına göre 10x10x50 mm eğme numuneleri için hazırlanan poliasetal kalıba konulmuştur. Plastik film ile sarılan kalıp etüvde 50 °C sıcaklıkta 48 saat tutularak bulamaç olgunlaştırılmıştır ve sonuç malzemeler Şekil 4.5’de verilmektedir. Si/Al oranı 1-35 oranında üretilebilmekte ve düşük teknoloji çimentodan ileri teknoloji seramik ve kompozitlere kadar geniş bir alanda kullanılabilir. Bu nedenle Si/Al geopolimer kompozisyonların hazırlanmasında önemli bir parametredir (Gao ve ark., 2020).

**Tablo 4.3.** Pomza-2 malzemesine ilave edilenlerin miktarları

Pomza (1 Mole)	Numune	Si/Al Oranı	Pomzadaki Toplam Katkı Maddesi Miktarı
<b>Metakaolin</b>	MK_8M	3,06	21,91
	MK_14M	2,52	32,93
	MK_20M	2,21	41,23
<b>Silis Dumani</b>	FS_8M	5,39	7,07
	FS_14M	5,75	11,76
	FS_20M	6,11	16,00
<b>Dumani</b>	FS+MK_8M	3,98	35,95
	FS+MK_14M	3,71	49,55
	FS+MK_20M	3,56	58,38

#### 4.4. Sonuç Yapısal Malzeme Karakterizasyonu

##### 4.4.1. Üç nokta eğme testi

Üç-nokta eğme (destekler arası mesafe 30 mm ) ve basma testleri 0.5 mm/dak hızında 100 kN yük hücresi kullanılarak Shimadzu mekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin eğme ve basma dayanımları yüke eğme dayanımı denklem (1)' e göre;

$$\sigma=3FL/2wt^2 \quad (1)$$

Denklem (1) 'de F: kırılma yükü (N), L: destekler arası mesafe (mm), w: numune genişliği (mm), t: numune kalınlığına (mm) işaret etmektedir.

#### 4.4.2. Basma testi

Basma dayanımı ise denklem (2) 'ye göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = F/A \quad (2)$$

Denklem (2) 'de F: kırılma yükü (N), A: numune kesit alanını (mm<sup>2</sup>) ifade etmektedir.

#### 4.4.3. XRD analizi

Sonuç malzemenin XRD analizleri, bir CuK $\alpha$  kaynağı ( $\lambda = 15406$  nm) ile donatılmış bir Siemens-Bruker D8 Advanced cihazında, X-ışını kırınımı ile yapıldı. Testler 40 kV, 30 mA'da yapıldı ve Bragg açısı ( $2\theta$ ) 0,02 adım boyutu ve 1° tarama hızı ile 5° ila 80° arasında idi. GP-kompozitler analizinden önce ince bir şekilde toz haline getirildi ve tüm veriler Jade 9 yazılımı kullanılarak analiz edildi.

#### 4.4.4. Taramalı elektron mikrosko analizi (SEM)

GP numunelerinin kırılma yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) bir JEOL JSM 6060LV SEM (JEOL USA, Inc., Peabody, MA) içinde gerçekleştirilmiştir. Örneklerin bazıları, görüntüleme kalitesini iyileştirmek için ~5 nm Au/Pd alaşımı ile kaplandı. Numuneler, yüksek vakum modunda 20 kV'luk bir hızlanma voltajında ikincil elektron görüntüleme kullanılarak farklı büyütme oranlarında görüntülendi.

#### 4.4.5. Weibull istatistiksel analizi

Weibull istatistikleri, tipik doğrusal istatistiksel yöntemle göre hesaplandı.  $P_i$ 'nin, test edilen toplam numune sayısı olan 1'den N'ye kadar bir sıralama olduğu varsayıldığından, Medyan sıralama yöntemi kullanılarak maksimum kırılma mukavemetine dayalı olarak bir dağılım fonksiyonu olan  $P_i$  hesaplanmıştır Denklem (3). (Samuel ve ark., 2021, Ganesh ve ark., 2021).

$$P_i = (i - 0.5) / N \quad (3)$$

burada, sırasıyla minimum ve maksimum kuvvete 1 ve N sayısı atanmıştır. Denklem'den hesaplanan istatistiksel veriler kullanılarak doğrusal bir biçimde çizim oluşturulabilir. Denklem (4) ve (5).

$$x_i = \ln(\text{strength}) \quad (4)$$

$$y_i = \ln[-\ln(1 - P_i)] \quad (5)$$

Weibull olasılık grafiği, dağılımın parametrelerini tahmin etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Grafik yönteminde, Weibull olasılık dağılımının parametreleri grafik çizilerek

hesaplanır, yani burada herhangi bir hesaplama yoktur. Grafik yönteminde öncelikle veri küçükten büyüğe doğru sıralanır ve her bir gözlem değeri için sıra medyanları hesaplanır. Sıra medyanlarının hesaplanmasında ,

$$\frac{i-0.3}{N+0.4} \cdot 100 \quad (6)$$

formülü kullanılmaktadır.

Dağılımın Weibull olasılık grafiği,

$$y = y(x) = \ln\{1/(1- F(t))\} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilen dönüşüm ile başlar.

İki parametrelili dağılım için grafik düz bir çizgi iken, üç parametrelili dağılımda grafik eğri şeklindedir. Grafik yönteminde veriler küçükten büyüğe doğru sıralandıktan sonra ,

$$x = \ln(T) \text{ ve } y = \ln\{1/(1-F(t))\} \quad (8)$$

hesaplanır. Böylece, bu değerler ile grafik çizilir.

Seramik ve cam gibi gevrek malzemelerin mukavemetleri çatlak boyutu ve şekli ile orantılı olduğundan kalitatif olarak açıklanabilmektedir. Gevrek malzemelerin mukavemet dağılımları mühendislik kullanımı açısından önem taşımaktadır. Mukavemet değerleri, dizayn açısından ortalama değerinin altında bir mukavemet değeri seçilerek kullanılır. Ayrıca aynı gerilim altında, büyük numunelerin kırılma olasılığı küçük numunelere göre daha yüksektir. Bunun nedeni, büyük hacimde daha fazla hatanın bulunma olasılığıdır. Dolayısıyla bunları kantitatif olarak açıklamak güvenli kullanım açısından önem taşımaktadır. Weibull istatistiksel dağılımı bu gibi durumlarda kullanılan bir yöntemdir (Watchman, 1996). Weibull dağılımı iki kısımda incelenir. Bunlardan birincisi en zayıf mukavemet değeri ile ortalama mukavemetin tüm sonuçlara bağımlılığı, ikincisi ise dağılım fonksiyonunun tahminidir.

Weibull dağılımında, malzeme gerilim altında n eşit hacim elementine bölünür. Pf, malzemenin gerilim altında kırılma olasılığıdır. Malzemenin kırılma ve kırılmama olasılıkları toplamı 1 olacağından Ps = 1 - Pf kırılmama olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Malzemeye uygulanan gerilim tüm hacim elementleri için aynı ve malzeme de homojen kabul edildiğinden malzemenin uygulanan yük altında kırılmaması gerekmektedir. Buna göre Weibull dağılım fonksiyonu,

$$P_s = \exp\left(-V\left(\frac{\sigma_k}{\sigma_{0i}}\right)^m\right) \quad (9)$$

olarak verilmektedir. Burada  $\sigma_{0i}$  ve m Weibull parametreleri olarak tanımlanmaktadır. V,  $V/V_0$  alındığında  $\sigma_{0i}$  birim hacimdeki mukavemeti verir. Denklem 9'da her iki tarafının logaritması alınarak bulunan eşitlik düzenlenip tekrar eşitliğin her iki tarafının logaritması alındığında

$$\ln = \left( \ln \frac{1}{P_s} \right) = m \ln \sigma_k + \ln V - m \ln \sigma_{oi}$$

(10)

bulunur. Denklem 10'da V ve  $\sigma_{oi}$

sabittir ve i'nci mukavemet değeri için kırılmama olasılığı

$$P_{si} = 1 - \frac{i-0,5}{n} \quad (11)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada n, numune sayısıdır

$$\ln = \left( \ln \frac{1}{P_s} \right) = m \ln \sigma_k + \ln V - m \ln \sigma_{oi}$$

(12)

elde edilir.

$$\left( \ln \frac{1}{P_s} \right) \text{ ile } y = y(x) = \ln\{1/(1 - F(t))\} \quad (13)$$

$$\ln \sigma_k y = y(x) = \ln\{1/(1 - F(t))\} \quad (14)$$

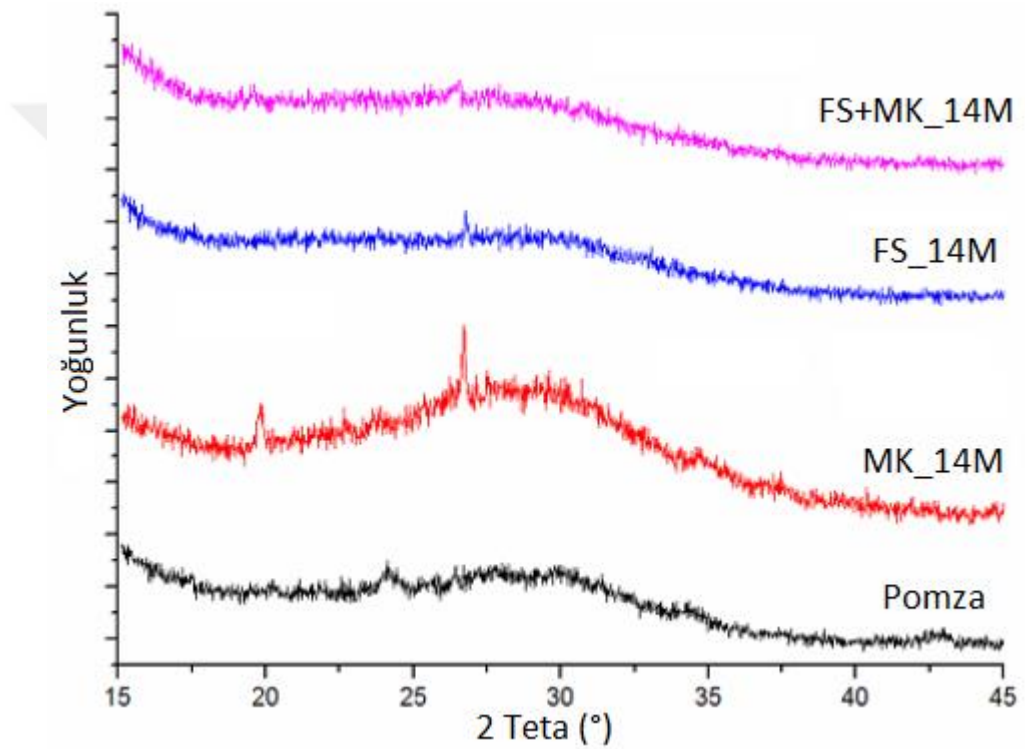
arasında çizilen grafikte eğim Weibull Parametresi olarak bilinen m'i verir. Weibull parametresinin yüksek değerde oluşu istatistiksel olarak malzemenin daha güvenilir olduğunu ifade eder (Watchman, 1996).

## 5. BÖLÜM

### MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER

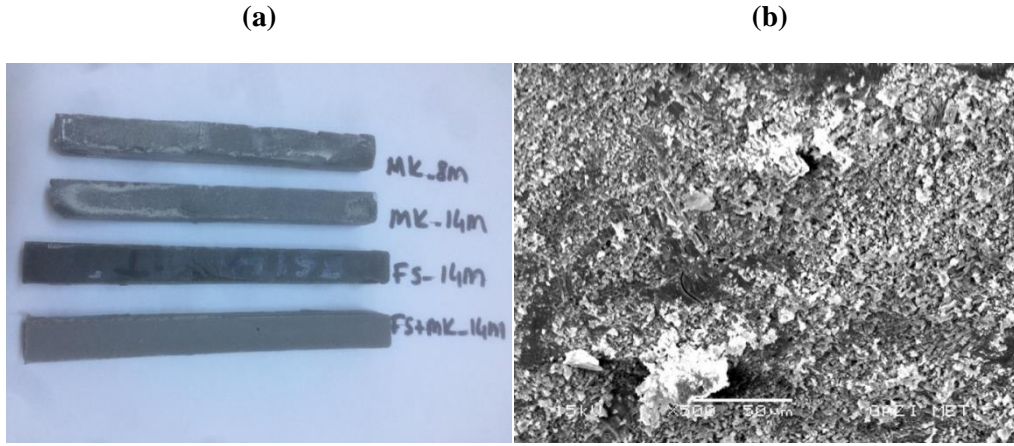
#### 5.1. Mikroyapı ve Mekanik Özellikler

Üretilen numunelerin XRD desenleri Şekil 5. 1’de verilmektedir. XRD desenleri, metakaolin ilavesinin Pomza’da geopolimerik reaksiyonunu arttırdığını göstermektedir. XRD sonuçları ile uyumlu olarak metakaolin katkılı pomza numuneleri daha yüksek mukavemet göstermiştir (Şekil 5.3).



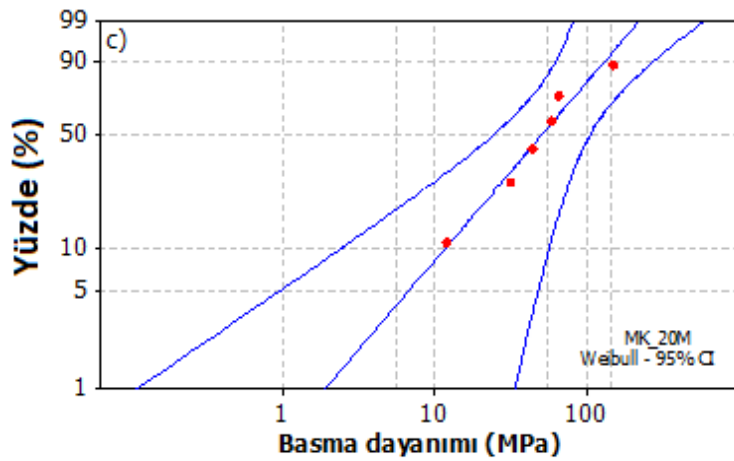
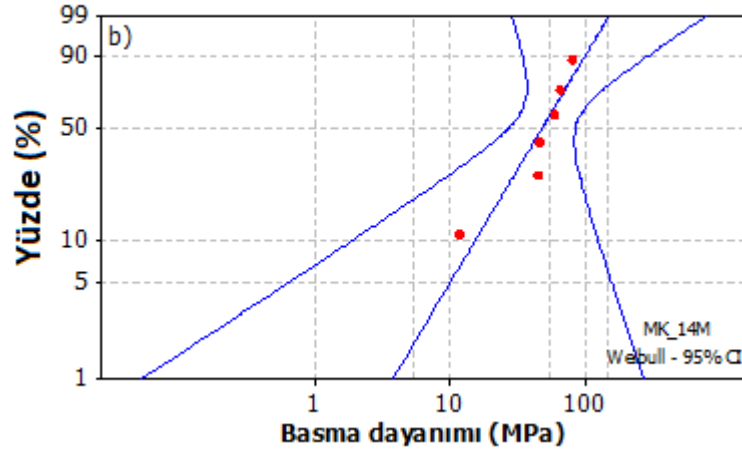
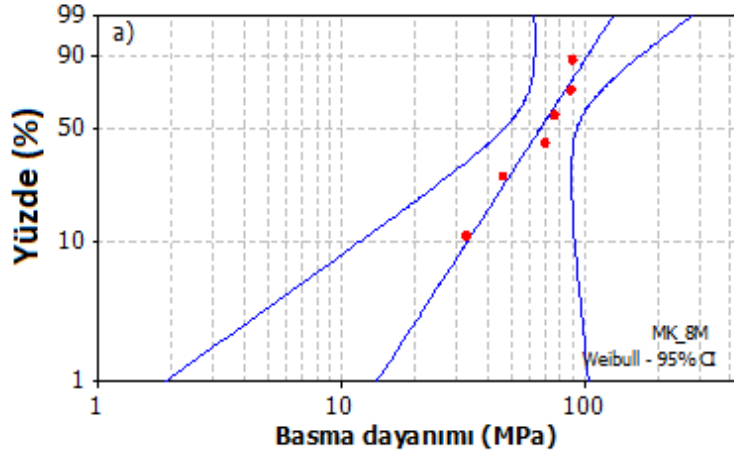
**Şekil 5.1.** Üretilen 14 M numuneleri ve orijinal pomza-2 nin XRD desenleri.

Üretilen numunelerin makro ve mikro görüntüleri Şekil 5.2’de verilmektedir. Makro görüntülerden silis dumanı ilaveli numunelerde yapısal bütünlük rijitlik ve yüzey düzgünlüğü iyi görünmektedir Şekil 5.2(a). Metakaolin ilaveli numunelerde ise bu üç durum iyi görünmemektedir. İlavesiz pomza numunenin kırk yüzey SEM görüntülerine bakıldığında ise reaksiyona uğramamış bölgeler (Granizo ve ark., 2007) nedeni ile homojenize bir reaksiyon gerçekleşmediği görülmektedir Şekil 5.2(b).



**Şekil 5.2.** Üretilen numunelerin makro ve mikro görüntüleri; (a) farklı molar oranlı numunelerin makro görüntüleri, (b) ilavesiz pomza kırık yüzey.

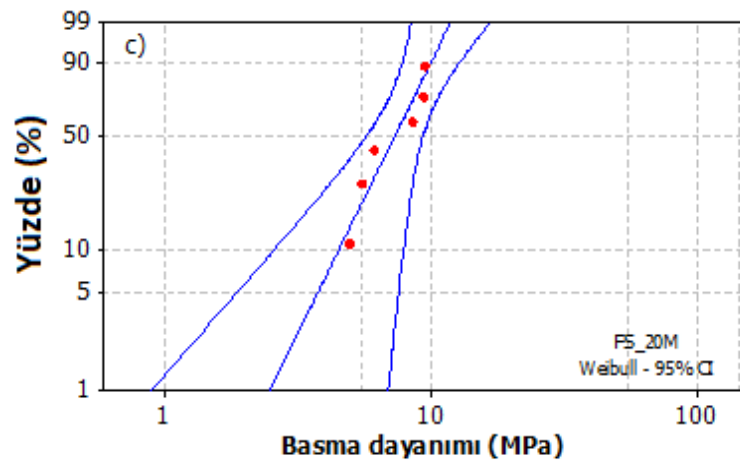
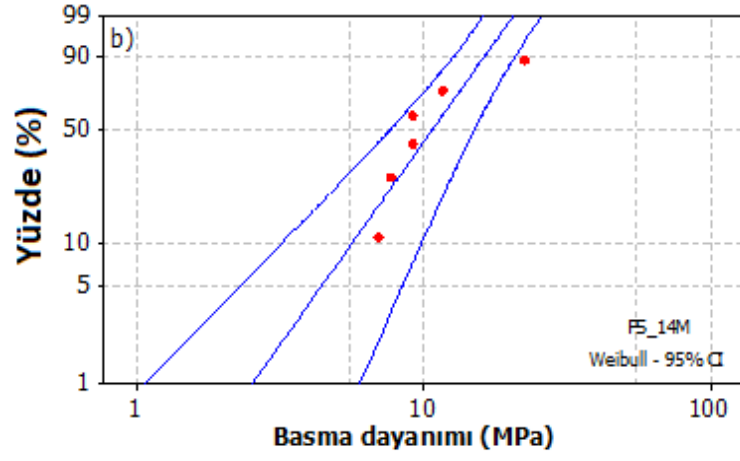
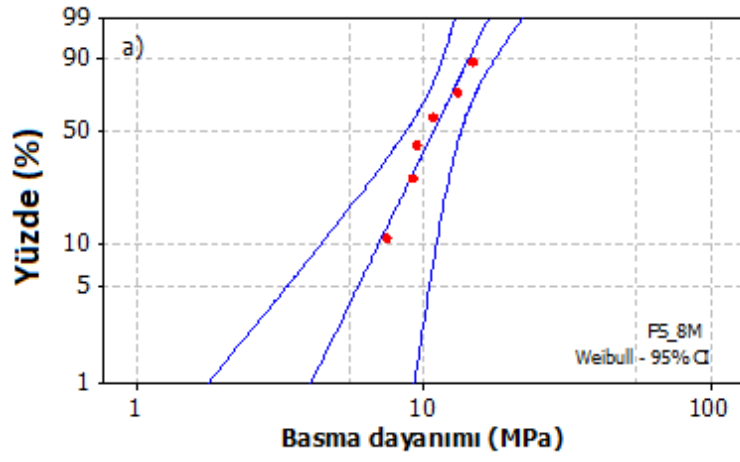
Şekil 5.3-5.5'te üretilen numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri verilmektedir. Tablo Molar oranından bağımsız olarak değerlendirildiğinde metakaolin içeren tüm numunelerde (Şekil 5.3) silis dumanı (Şekil 5.4) ve metakaolin+silis dumanı (Şekil 5.4) içeren numuneler ile karşılaştırıldığında basma dayanımı daha geniş bir dağılım sergilemektedir. Bu durum Şekil 5.2 (a) daki makro görüntülerde metakaolin numunelerin zayıf yapısal bütünlüğünden kaynaklanmaktadır. Tablo 4.3 'de Si/Al oranı esas alınarak hazırlanan ve buna bağlı olarak pomzadaki katkı miktarları da değerlendirilğinde metakaolin numuneleri literatürdeki tipik geopolimer formülasyonuna en yakındır (Kriven, 2010, Doğan ve ark., 2021)(Duxson ve ark. 2005). Metakaolin numuneler molar bazda değerlendirildiğinde ise (Şekil 5.3 (a-c) azalan Si/Al oranının daha geniş bir güvenlik aralığı ve buna bağlı olarak Weibull modülüsün azalması ile sonuçlandığı görülebilir. Önceki bir çalışmada (Occhipinti ve ark. 2020) ağırlık olarak metakakaolin miktarı %20-30 arasında kullanılmıştır. Artan metakaolin miktarına bağlı olarak reaksiyona giremeyen bileşenlerin yapıda toplanması da bu geniş dağılımın nedeni olarak verilebilir. Şekil 5.1'deki XRD desenlerinden metakolin içeren numunelerde yüksek geopolimerleşme gerçekleşmiş, bu durum basma dayanımına yansımış ve metakaolin numunelerin basma dayanımları diğerlerine göre daha yüksek ölçülmüştür.



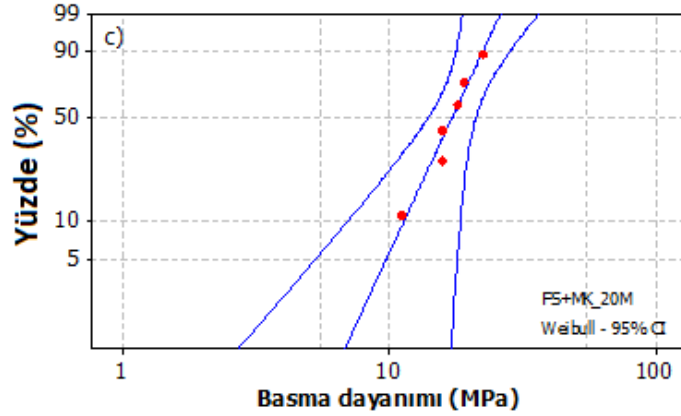
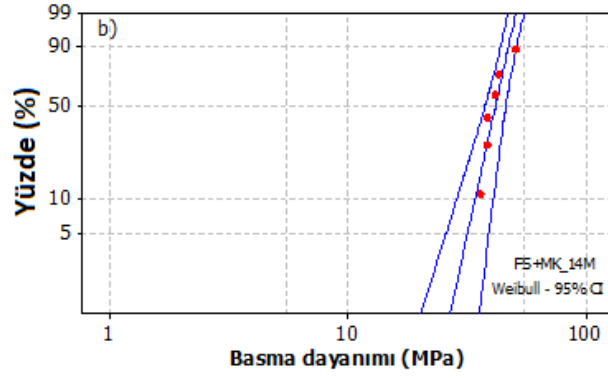
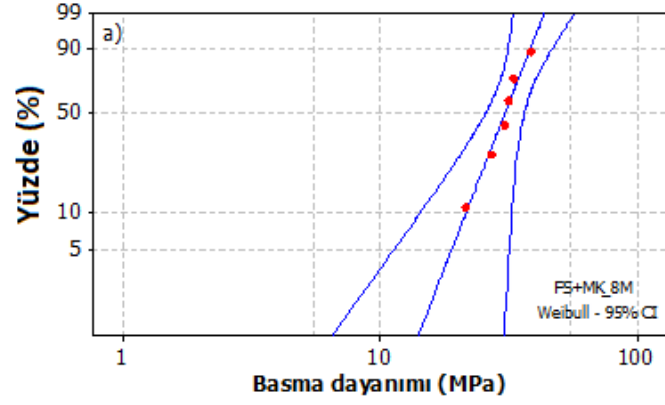
Şekil 5.3. Metakaolin numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri; (a) MK\_8M (b) MK\_14M (c) MK\_20M.

Şekil 5.4 silis dumanı içeren numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri verilmektedir. Bu numelerde esasen Si/Al oranı yapısal malzeme anlamında tipik geopolimer içeriğinin üzerindedir ve daha çok yüksek sıcaklık kompozitlerde kullanılmaktadır (Gao ve Ark. 2020) ancak bu çalışmada silis dumanı geopolimer esaslı malzemelerin tipik bir bileşeni ve pomzanın reaksiyonunu artırabilecek daha yüksek yüzey alanına sahip olması nedeni ile kullanılmıştır. Pomzanın zaten yüksek silika içeriği nedeni ile toplan katkı miktarının diğer numunelere (Şekil 5.3) (Şekil 5.5) göre oldukça az olması ve yüksek Si/Al oranı iyi bir yapısal bütünlükte net şekilli numuneler elde edilmiştir. Silis dumanının yüksek yüzey alanı nedeni su tutuculuğu numunelerde yedi gün sonunda daha az ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. Olasılık grafikleri incelendiğinde (Şekil 5.4 (a-c) düzgün yüzey nedeni metakaolin numunelere göre basma dayanımı daha dar bir dağılım göstermektedir. Weibull modülüsünde önemli bir değişim olmamakla beraber basma dayanımının oldukça düşük olduğu görülmektedir. (Ma ve ark 2003) yüksek silisyum içeriği numunelerde toplam gözenekliliği azalttığını rapor etmişler bu diğer numunelere göre silisyum yüksek numunelerde daha düzgün bir numune eldesini destekleyebilir. Ancak bu durumda silisyumun dolgu görevi yapmasına rağmen yedi günlük süre olgunlaşma için yeterli olmadığından numunelerin basma dayanımına olumlu etkilediği görülmektedir. Basma dayanımı sonuçları yine Şekil 5.1 de XRD desenlerinden silis dumanı içeren numunelerde oldukça zayıf geopolimerleşme ile uyumludur.

Şekil 5.5 silis dumanı + metakaolin içeren numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri verilmektedir. Si/Al oranı diğer diğer iki grup numunelerin ortasında olması nedeni ile bu numunelerin Weibull modülüs ve basma dayanımları da iki grup numunenin arasında görülmektedir. FS+MK\_14M numunesi diğer iki grup numunelerin aynı molar oranlı numunelerden alınan Şekil 5.1'de XRD analizlerinde diğer numunelerin ortasında bir geopolimerik eğri vermektedir. Bu grup numunelerde yine metakaolinin dayanıma olumlu etkisi nettir (Occhipinti ve ark. 2020). Diğer iki grup numuneye göre daha dar bir güvenlik aralığına sahiptirler. FS+MK\_14M numunesi Şekil 5.5 (b) diğerlerine göre Şekil 5.5 (a) Şekil 5.5 (c) en dar dayanım aralığı, en yüksek Weibull modulus ve basma dayanım sergilemektedir. Bu durumda ileriki çalışmalara 14 mol metakaolin ile devam edilip numunelerde yapısal bütünlüğün iyileştirilmesi üzerine çalışılmalıdır.



Şekil 5.4. Silis dumanı numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri; (a) FS\_18M (b) FS\_14M (C) FS\_20M.



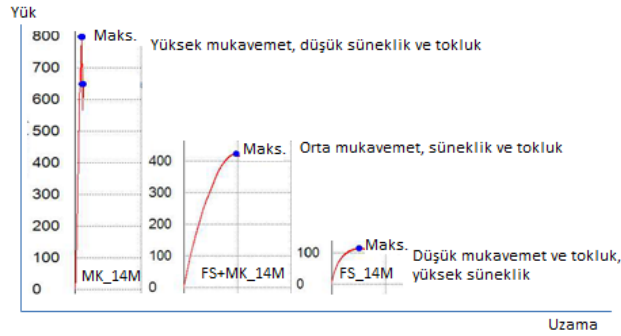
**Şekil 5.5.** Silis dumanı ve matakaolin numunelerin basma dayanımı olasılık grafikleri ; (a) FS+MK\_8M (b) FS+MK\_14M (c) FS+MK\_20M.

Minitap programında çizilen basma dayanımı olasılık grafiklerinin Tablo 5.1 'de tüm sonuçları verilmiştir. Weibull grafiklerinin yorumlasından sonra bu tablodan da görüleceği üzere tüm Weibull değerlerinin her üç bileşimde de 14 M numunelerinde uygun olduğu söylenebilir.

**Tablo 5.1.** Basma testi sonuçları

Pomza (1 Mole)	Numune	Weibull Modulus, m	Biçim Parametresi, (Mpa)	Weibull Ortalama (Mpa)	Standart Sapma (Mpa)	95% Güvenlik Aralığı (Mpa)
Metakaolin	MK_8M	2,73	75,75	67,39	26,62	67±20.8
	MK_14M	1,61	60,10	53,78	33,3	53±26.4
	MK_20M	1,28	67,97	62,92	49,31	62±39.2
Silis Dumanı	FS_8M	4,28	11,81	10,75	2,83	10±1.6
	FS_14M	2,92	12,18	10,87	4,04	10±3.2
	FS_20M	3,9	8,08	7,31	2,09	7±1.6
Metakaolin + Silis Dumanı	FS+MK_8M	5,42	32,85	30,30	6,44	30±4.8
	FS+MK_14M	9,58	43,40	41,22	5,16	41±4
	FS+MK_20M	4,55	18,7	17,08	4,26	18±3.2

Şekil 5.6'da Tablo 5.1'den alınan 14 M numunelerinin yük-uzama eğrileri verilmektedir. Sonuç numunelerin ilave türüne bağlı olarak farklı karakterde yük-uzama eğrileri sergiledikleri görülmektedir. Bu da sonuç malzemeden istenen mekanik özelliğe bağlı olarak başlangıç karışımın tasarlanabileceği anlamına gelmektedir.



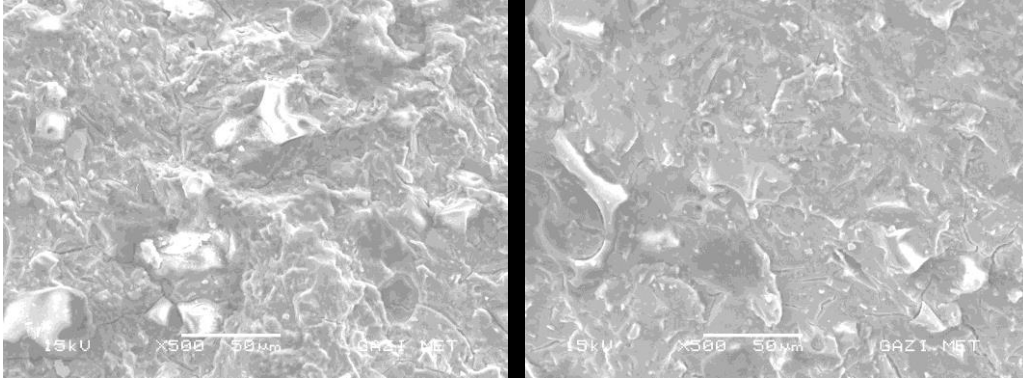
**Şekil 5.6.** 14 M numunesinin basma testi sonuçlarından yük-uzama eğrileri.

Basma dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde metakaolin içeren ve özellikle de 14 M olan numunelerden uygun değer alındığından ve seçilen parametre uzayını hem içerik hemde miktar bakımından temsil etmesi için silis dumanı+metakaolin içeren numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri alınmış ve Şekil 5.7'de verilmektedir. Şekil 5.7' (a) haricinde bütün numuneler farklı oranlarda silis dumanı içermektedir. Tablo 4.3'ten Si/Al oranı MK\_14M numunesinde 2.52 olup en düşük ve FS\_14M numunesinde 5.75 olarak en yüksek, diğerlerinde ise 3.5-4 arasındadır. Sadece metakaolin ilaveli numune Şekil 5.7' (a) çoğunlukla

iyi homojenize olmuş ve reaksiyona uğramış bölgelerin yanında reaksiyona uğramayan kısımlarda gözlenmektedir (Occhipinti, 2020). Silis dumanının pomza ve metakaoline göre daha ince boyutta ( $0.007 \mu\text{m}$ ) olması yüksek yüzey alanı nedeni daha tek düze bir kırık yüzey görülmektedir Şekil 5.7 (b). Şekil 5.7 (c) de FS+MK<sub>14M</sub> numunesi metakaolinin etkisi ile iyi reaksiyona uğramış homojen kısımlar (Kriven ve ark, 2003) ile birlikte makro gözenek ve çatlaklar görülmektedir. FS+MK numunelerinde her ne kadar Si/Al oranı orta miktarda olsada ilave miktarları diğerlerinden oldukça yüksek olduğundan silis dumanının küçük boyutu daha ince ve tekdüze bir yapının oluşmasına neden olmuştur Şekil 5.7 (d) ve Şekil 5.7 (e). Yine bu numunelerde de geopolimerleşmede kaçınılmaz olan ve mekanik özellikleri olumsuz etkileyen kuruma çatlaklarına raslamak mümkündür (Bell ve ark. 2008. Duxson ve ark.2005).

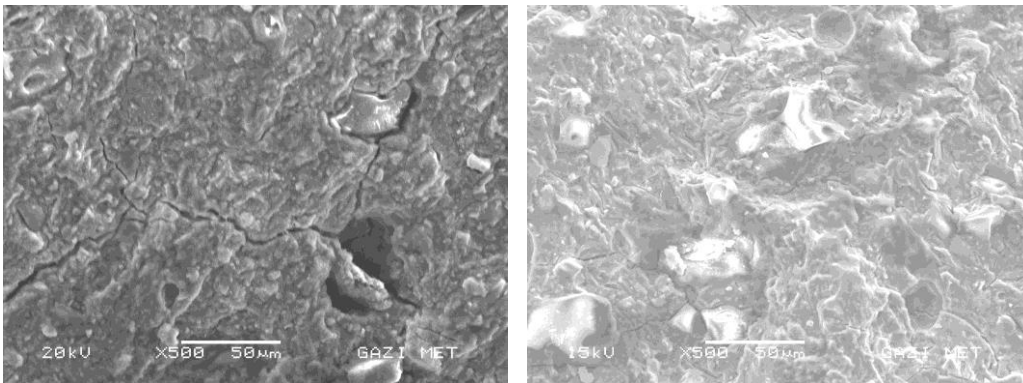
(a)

(b)



(c)

(d)



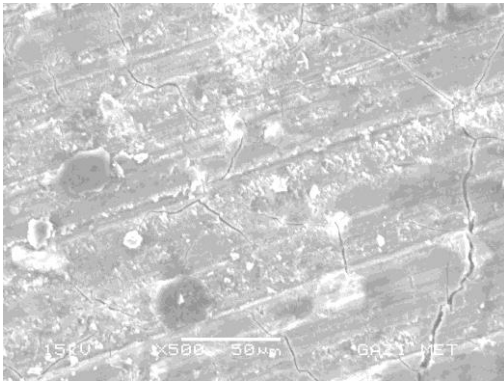
(e)



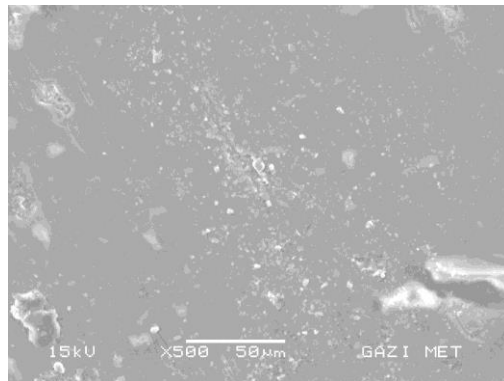
**Şekil 5.7.** Üretilen numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri; (a) MK\_14M (b) FS\_14M (c) FS+MK\_14M (d) FS+MK\_8M (e) FS+MK\_20M.

Şekil 5.8'de 14 M katkı içeren numuneler ile birlikte silis dumanı+metakaolin içeren numunelerin parlatılmış yüzey SEM görüntüleri verilmektedir. Geopolimerlerde tipik kuruma çatlaklarının yanısıra reaksiyona girmemiş katı alümina silikatlardan kaynaklanan boşluklarda sözkonusudur (Kriven, 2003, Duxson, 2006). Numunelerde parlatma sırasında pomza ve metakaolinin sertleşmiş katı parçacıklarının martit yapıdan ayrılması ile oluşan boşluklar ve bu katı parçacıklarının matris yapıda oluşturduğu yırtıklar da görülmektedir (Şekil 5.8 (a) ve (e)). Şu ana kadar reaksiyona girmeyen başlangıç malzemesinin miktarını tam olarak belirleyebilen bir yöntem geliştirilememiştir (Duxson, 2005). Ancak mikroyapıdan parlatma sonucu ve yüzeylerde değişen boyut ve şekillerde reaksiyona uğramayan kalıntıları görmek mümkündür (Granizo ve ark., 2007).

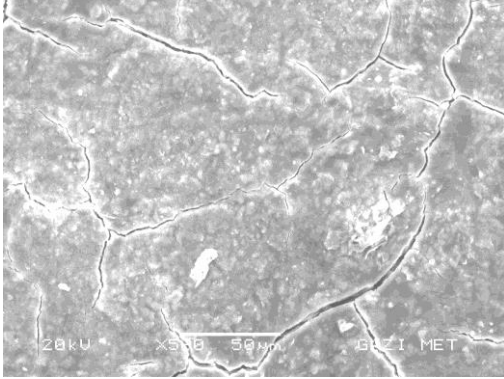
(a)



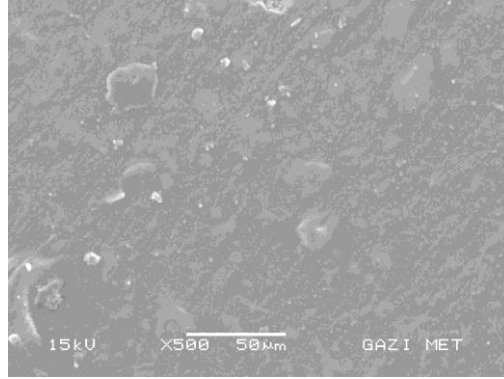
(b)



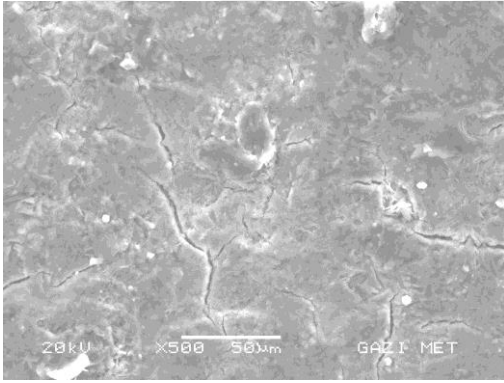
(c)



(d)



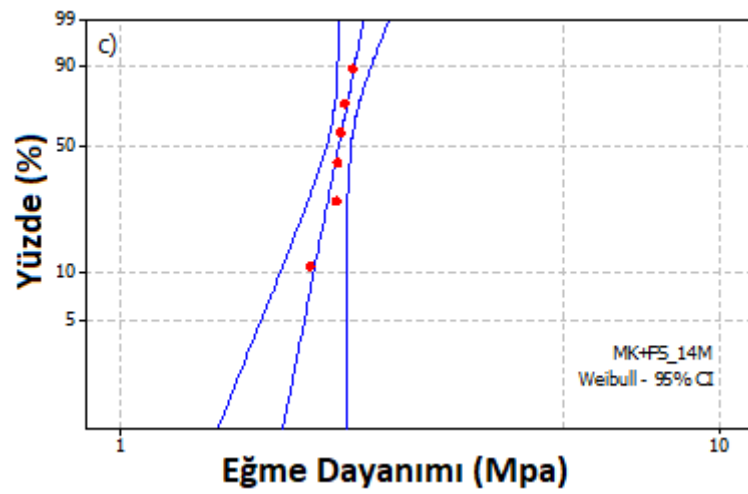
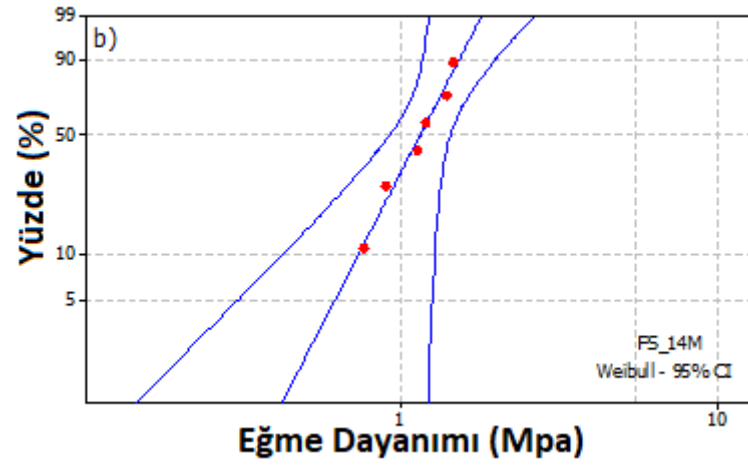
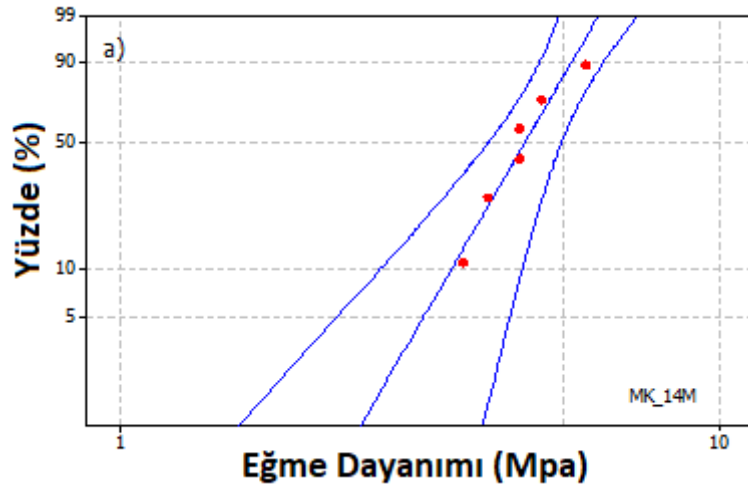
(e)



**Şekil 5.8.** Üretilen numunelerin parlatılmış yüzey SEM görüntüleri; (a) MK\_14M (b) FS\_14M (c) FS+MK\_14M (d) FS+MK\_8M (e) FS+MK\_20M.

Buna bağlı olarak mekanik özelliklerinde değişeceği bilinmektedir ve bu nedenle bu çalışmada mekanik özellikler istatistik olarak analiz edilmiştir (Tablo 5.1). Yalnız silis dumanı içeren numunede ve FS+MK\_8M numunesinde makro görüntüler ile uyumlu şekilde nispeten reaksiyona girmemiş pomza ve makro boşlukla beraber genelde yüzey düzgündür (Şekil 5.8 (b)ve (d)). Silis dumanı ve metakaolin numunelerin özellikle (Şekil 5.8 (c) ve (e)) homojen taneli reaksiyon bölgeleri ve tipik şekilli çatlak yanında yüksek silika ilavesi nedeni ile yüzeyde düzgün dağılımlı küçük boyutta reaksiyona uğramayan malzeme kalıntıları görülmektedir (Kriven, 2014, Bell, 2009).

14 M ilaveli üç grup numunenin eğme dayanımı olasılık grafikleri Şekil 5.9 'da verilmektedir. Basma numunelerine benzer şekilde metakaolin içeren numunelerin eğme dayanımlarında diğer numunelere göre yüksektir. Weibull modülüs FS+MK\_14M numunesinde yüksek olmasına karşın MK\_14M dayanım en yüksek olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.9. Silis dumanı ve matakaolin numunelerin eğme dayanımı olasılık grafikleri ; (a) MK\_14M (b) FS\_14M (c) FS+MK\_14M.

Tablo 5.2' de Minitap programında çizilen eğme dayanımı olasılık grafiklerinin tüm sonuçları verilmiştir. Weibull grafiklerinin yorumundan sonra eğme testi sonuçlarından da numunelerin eğme dayanımlarının basma dayanımları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Metakaolin ilaveli numunelerin yüksek ve saf netakaolin geopolimerlere benzer eğme dayanımı sergiledikleri görülmektedir.

**Tablo 5.2.** Eğme testi sonuçları

Pomza	Numune	Weibull Modulus, m	Bıçım Parametresi, (Mpa)	Weibull Ortalama (Mpa)	Standart Sapma (Mpa)	95% Güvenlik Aralığı (Mpa)
Eğme	MK_14M	6,7	4,98	4,65	0,813	4±0
	FS_14M	4,2	1,24	1,13	0,30	1±0
	FS+MK_14M	19,64	2,35	2,28	0,144	2±0

Tablo 5.2' de tüm mekanik ve mikroyapı sonuçları değerlendirilerek seçilen 14M ilaveli numunelerin ısı direnç, ısı iletkenlik ve numune yoğunlukları verilmektedir. Ölçülen numune yoğunlukları başlangıç ilave mazlemeleri dikkate alındığında birbiri ile uyumlu ve genel anlamda da sadece metakaolin içeren numunelerin yoğunlukları ile de karşılaştırılabilir. Geopolimerleşme işlemi ile sırasında çoklu yoğunlaşma nedeni ile amorf pomzadaki gözeneklilik oranı (% 70-80) sonuç malzemede yaklaşık yarıya düşmüştür. Bu durum pomza yoğunluğunun (1 g/cm<sup>3</sup>) (Gündüz ve ark., 2001; Rittmann, 1976) tüm numunelerde artması ile sonuçlanmıştır. Tipik metakaolin esaslı geopolimerlerde hacimce gözeneklilik 0,4106 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, ortalama gözenek çapı 3,3711 nm değerindedir (Kriven, 2004). Si/Al oranı 2.15 olan numunede 1.798 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk gerçekleşmiştir (Duxson, 2005). Bu çalışmanın konusu, gözenekli malzeme üretiminden ziyade tipik GP malzemenin metakaoline alternatif bir alüminosilikat kaynağı (pomza) ile üretilebilirliğini araştırmaktır. Isıl iletkenlikler de metakaolin esaslı geopolimerlerinin ısı iletkenliğinden (0,53- 0,8 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) oldukça düşük ölçülmüştür (Duxson ve ark., 2006).

**Tablo 5.3.** Isıl iletkenlik ve yoğunluk testi sonuçları

Numune	Isıl Direnç, m <sup>2</sup> K/W	Isıl İletkenlik( λ), W/mK	Ölçülen Numune Yoğunluğu, g/cm <sup>3</sup>
MK_14M	0,0213	0,1410	1,8206
FS_14M	0,0232	0,1784	1,6612
FS+MK_14M	0,0347	0,1011	1,5928

## SONUÇLAR

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlara varılabilir;

Pomza, değişen oranlarda metakaolin ve silis dumanı ilavesi reaktivitesini artırarak geopolimer formülasyonunda alüminosilikat kaynağı olarak kullanılabilir. XRD desenleri, metakaolin ilavesinin Pomza'da silis dumanından daha fazla geopolimerizasyona yol açtığını göstermektedir. 50 °C/48 saat kürlendikten sonra, özellikle silika dumanlı durumda silikanın yüksek yüzey alanı nedeni ile numunelerde metakaolin esaslı GP'lere kıyasla çok yavaş ağırlık kaybı görülmüştür. XRD sonuçları ile uyumlu olarak metakaolin katkılı pomza numuneleri diğer numunelere göre daha yüksek basınç dayanımı ortaya koymuştur. Metakaolin ilaveli pomza numuneleri sadece metakaolinden üzerilen GP malzeme ile karşılaştırılabilir mekanik özellikler ve fiziksel özellikler ortaya koymuştur. Metakaolin ilavesi ile GP formülasyonunun hem katı hem de sıvı tarafında pomzanın reaktivitesini ve sonuç malzemenin yapısal bütünlüğü arttırmaya yönelik alternatif yöntemler gelecekteki bir çalışma olarak denenmesi önerilmektedir.

## KAYNAKÇA

- Aiello, R., Crea, F., Nastro, A., Subotic, B., Testa, F. (1991). Influence of Cations on the Physicochemical and Structural Properties of Aluminosilicate Gel Precursors. Part 1. Chemical and Thermal Properties. *Zeolites* 11 (8), 767-775.
- Alonso S, Palomo A (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Mater Lett* 47(1-2), 55-62
- Bagci Cengiz, Kafkas Dogan, Samuel Devon, Kriven Waltraud M. (2022). investigation of suitability of pumice from TÜRKİYE for geopolymer formation. Hybrid 46th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC 2022) (Özet Bildiri/Davetli Konusmacı).
- Barbosa V.F.F. and MacKenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers, *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309-317.
- Bell, J. L., Driemeyer, P. E., & Kriven, W. M. (2009). Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers. Part II: K-based geopolymer. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(3), 607-615.
- Bell, J. L., Driemeyer, P. E., & Kriven, W. M. (2009). Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers: Part I—Cs-based geopolymer. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(1), 1-8.
- Bell, J.L. and Kriven, W. M. (2009). Formation of an Iron-Based Geopolymer Analogue, *Cer. Eng. and Sci. Proceedings*, 30, issue 2, pp x-x. Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites IV. Edited by Dileep Singh and Waltraud M. Kriven, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 30(2), 301-312.
- Bell, J.L. and Kriven, W.M. (2008). Preparation of Ceramic Foams from Metakaolin-based Geopolymer Gels, In *Developments in Strategic Materials*. Edited by Hua-Tay Lin, Kunihito Koumoto, Waltraud M. Kriven, David P. Norton, Edwin Garcia and Ivar Reimanis. *Cer. Eng. Sci Proc.*, 29(10), 97-112.
- Bell, J.L., Kriven, W.M., Johnson, A.P.R., Caruso, F. and van Deventer, J.S.J. (2007). Laser Scanning Confocal Microscopy Analysis of Metakaolin-based Geopolymers, *Cer. Eng. Sci. Proc.* 28(9), 273-282. In *Developments in Porous, Biological and Geopolymer Ceramics*, edited by Manuel Brito, Eldon Case, W. M. Kriven, volume editors; Jonathan Salem and Dongming Zhu, series editors; published by the American Ceramic Society.
- Bell, J.L., Sarin, P., Driemeyer, P. E., Haggerty, R. P., Chupas, P. J. and Kriven, W. M. (2008). X-ray Pair Distribution Function Analysis of Potassium Based Geopolymer, *Journal of Materials Chemistry*, 18(48), 5974 - 5981.
- Bell, J.L., Sarin, P., Provis, J.L., Haggerty, R. P., Driemeyer, P. E., Chupas, P.J., van Deventer, J.S.J. and Kriven, W.M. (2008). Atomic Structure of a Cesium Aluminosilicate Geopolymer: A Pair Distribution Function Study, *Chemistry of Materials*, 20(14), 4768-4776.
- Buchwald, A. H. (2004). Stabilised foam clay material with high performance thermal insulation properties. *CFI Ceramic Forum International*, (s. 39- 42).

- Comrie, D.C. and Davidovits, J. (1998). Long Term Durability of Hazardous Toxic and Nuclear Waste Disposals, Geopolymer '88: first European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France, 1, 125-134.
- Comrie, D.C. and Kriven, W.M. (2003). Composite Cold Ceramic Geopolymer in a Refractory Application, Advances in Ceramic Matrix Composites IX, Edited by N. P. Bansal, J. P. Singh, W. M. Kriven and H. Schneider published by American Ceramic Society. *Ceramic Transactions*, 153, 211-225.
- Comrie, D.C., (1988). The Use of Inorganic Binders for Waste Site Remediation's, Proceedings of 3rd Annual Conference and Exhibition of Hazardous Materials (HAZMAT) Canada, 1-5.
- Davidovits, J. (1988). Structural Characterization of Geopolymeric Materials with X-ray Diffractometry and MAS NMR Spectroscopy, 88'th European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France, (2), 149-166.
- Davidovits, J. (1992). *Mineral Polymers and Methods of Making Them*, US Patent 4349386.
- Davidovits, J. and Chromine, D.C. (1988). Archaeological Long-term Durability of Hazardous Waste Disposal Preliminary Results with Geopolymer Technologies, American Chemical Society Division of Environmental Chemistry, 237-240.
- Davidovits, J., Davidovits, M., Davidovits, N. (1998). Alkaline Alumina-silicate Geopolymeric Matrix for Composite Materials with Fiber Reinforcement and Method for Obtaining Same, U.S. Patent No.5, 798,307.
- Davidovits, J., Davidovits, N., Davidovits, M. (1992). Manufacture for Rapid -setting Geopolymeric Matrix Materials and Binders for Impregnating Fibrous Structures, and The Composition Obtained, FR. Patent No.2, 666,328.
- Davidovits, J. (1976). Solid Phase Synthesis of Mineral Blockcomposite by Low Temperature Polycondensation of Alumina-Silicate Polymers IUPAC Macromolecular Symposium, Stockholm, Sweden, 3-15.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic Polymeric New Materials, *J. Therm. Anal.*, 37, 1633-56.
- Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Szechyńska-Hebda, M., Parzych, S., & Hebda, M. (2021). Eco-friendly fired brick produced from industrial ash and natural clay: A study of waste reuse. *Materials*, 14(4), 877.
- DPT. (2001). Yapı Malzemeleri II (Mermer- Granit-Yapı Taşları-Arduvaz. Ankara: VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel ihtisas Komisyonu Raporu.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, A., Palomo, G.C., van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer Technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.*, 42, 2917-2933.
- Duxson, P., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (2006). Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers Used as a First Approximation for Determining Gel Interconnectivity. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45, 7781-7788.

- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., Jannie, S.J., van Deventer, J.S.J. (2005). Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical properties, *Colloids Surf. A.*, 269(1-3), 47-58.
- Faimon, J. (1996). Oscillatory Silicon and Aluminum Aqueous Concentrations During Experimental Aluminosilicate Watering *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(15), 2901-2907.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Sobrados, I., Sanz, S. (2006). The Role Played by the Reactive Alumina in the Alkaline Activation of Fly Ashes Microporous and Mesoporous Materials, 91(1-3), 111-119.
- Förster, S.C., Gralue, T.J. and Gaucler, L.J. (1995). Thermal and Mechanical Properties of Alkali-activated Alumina-silicate Based, High Performance Composites, *Advances in Science and Technology*, 7, 117-124, in *Advanced Structural Fiber Composites*. Edited by P Vincenzini, Techna Srl.
- Ganesh AC, Muthukannan M (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *J Clean Prod*, 282, 1245-43.
- Gao, B., Jang, S., Son, H., Lee, H. J., Lee, H. J., Yang, J. J., & Bae, C. J. (2020). Study on mechanical properties of kaolin-based geopolymer with various Si/Al ratio and aging time. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57(6), 709-715.
- Glad, B. E., Han, C. and Kriven, W. M. (2012). Polymer Adhesion to Geopolymer via Silane Coupling Agent Additives, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 95(12), 3758-3762.
- Glad, B.E. and Kriven, W.M. (2012). Humidity Effects on the Completion of Geopolymerization in Dilute Evaporative Slurries, *Cer. Sci. and Eng. Proc.* 33(10), 25-30.
- Glukhovskiy, V.D. (1994). Ancient, Modern and Future Concretes, *Alkali Cement and Concrete*, 1, 1-9.
- Granizo ML, Blanco-Varela MT, Martínez-Ramírez S (2007). Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. *J Mater Sci*, 42(9), 2934–2943.
- Gubb, T., Baranova, I., Allan, S.M., Fall, M.L., Shulman, H.S. and Kriven, W.M. (2011). Microwave Enhanced Drying and Firing of Ceramics, *Cer. Eng. Sci. Proc.* 32(10), 35-44.
- Gündüz, L., Çankiran O. ve Ark., (1998), *Pomza Teknolojisi*, Cilt I- II, SDÜ, Isparta.
- Gündüz, L., Rota, A., Hüseyin, A., (2001). *Türkiye Ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme karakteristiği Analizi*. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye.
- Hanjitsuwan S., Hunpratub S., Thongbai P., Maensiri S., Sata V., Chindapasirt P. (2014), Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, *Cement & Concrete Composites*, 45, 9-14.
- Hos, J. P., McCormick P.G. and Byrne, L.T. (2002). Investigation of a Synthetic Aluminosilicate Inorganic Polymer, *Journal of Materials Science*, 37, 2311-2316.
- Khater HM (2013). Effect of fumed silica on the characterization of the geopolymer materials. *Int J Adv Struct Eng* 5(1), 12.

- Kömürlü, R., Önel, H., (2007). Gazbeton Yapı Ürünlerinin Konutlarda Kullanımı, *YTÜ Mimarlık Fakültesi E- Dergisi*, 2(3), 145- 158.
- TS 453, (1988). *Gaz ve Köpük beton Yapı Malzeme ve Elemanları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Kriven, W. M. (2010). Inorganic Polysialates or 'Geopolymers, *American Ceramic Society Bulletin*, 89(49), 31-34.
- Kriven, W. M., Bell, J. L. and Gordon, M. (2003). Microstructure and Microchemistry of Fully-Reacted Geopolymers and Geopolymer Matrix Composites, *Ceramic Transactions*, 153, 227-250.
- Kriven, W. M., Bell, J. L. and Gordon, M. (2004). Geopolymer Refractories for the Glass Manufacturing Industry, *Cer. Eng. and Sci. Proc.*, 25(1), 57-79.
- Kriven, W. M., Gordon, M., & Bell, J. L. (2004). Geopolymers: nanoparticulate, nanoporous ceramics made under ambient conditions. *Microscopy and microanalysis*, 10(S02), 404-405.
- Kriven, W.M., Gordon, M., Ervin, B.L. and Reis, H. (2007). Corrosion Protection Assessment of Concrete Reinforcing Bars with a Geopolymer Coating, *Cer. Eng. and Sci. Proc.*, 28(9), 373-381.
- Layon, R.E., Balaguru, P.N., Foden, A., Soratia, U., Davidovits, J., Davidovits, M. (1996). Fire Resistant Aluminasilicate Composites, Proceedings of 1st International Conference on Fiber Composites Infrastructure, 972-981.
- Lowry, D.R. and Kriven, W.M. (2010). Effect of High Tensile Strength Polypropylene Chopped Fiber Reinforcements on the Mechanical Properties of Sodium Based Geopolymer Systems, in Strategic Materials and Computational Design, edited by Waltraud M. Kriven, Yanchun Zhou and Miladin Radovic. *Cer. Eng. Sci. Proc.* 31(10), 47-56.
- Ma Y., Hu J., Ye G. (2013). The pore structure and permeability of alkali activated fly ash, *Fuel*, 104, 771-780.
- Meesala CR, Verma NK, Kumar S (2020). Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Struct Concr*, 21(3), 1013-1028.
- Musil, S.S., Kutyla, G.P. and Kriven, W.M. (2012). The Effect of Basalt Chopped Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Potassium Based Geopolymer, *Cer. Eng. and Sci. Proc.*, 33(10), 31-42.
- Neville A.M. (1995). *Properties of concrete*, 4th edition, John Wiley, New York, Longman, Angleterre
- Occhipinti, R., Stroschio, 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*, 259, 120391.
- Okada, K. A. Ooyama, T. Isobe, Y. Kameshima, A. Nakajima, K.J.D. MacKenzie, (2009). Water retention properties of porous geopolymers for use in cooling applications, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 29(10), 1917-1923.
- Oh E.J., Jun Y., Jeong Y. (2014), Characterization of geopolymers from compositionally and physically different Class F fly ashes, *Cement & Concrete Composites*, 50, 16-26

- Özkan, Ş.G., Tuncer, G., (2001). Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye.
- Parathi, S., Nagarajan, P. & Pallikkara, S.A. (2021). Ecofriendly geopolymers: a comprehensive review. *Clean Techn Environ Policy* 23, 1701–1713.
- Rahier, H. Van Mele, B., Wastiels, J. (2002). Low Temperature synthesized Aluminasilicate Glasses, Part II. Rheological Transformations During Low-temperature Glasses, *Journal of Materials Science*, 37, 2311-2316.
- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J. and Wu, X. (1996). Low-Temperature synthesized Aluminasilicate Glasses, Part I. Low-Temperature Reaction Stoichiometry Structure of a Model Compound, *Journal of Materials Science*, 31, 71-79.
- Ribeiro, R. A. S., Ribeiro, M. S., & Kriven, W. M. (2017). A review of particle-and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *J. Ceram. Sci. Technol*, 8(3), 307.
- Rickard A.D.W., Temuujin J., van Riessen A. (2012). Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358, 1830-1839.
- Rill, E., Lowry, D. and Kriven, W.M. (2010). Properties of Basalt Fiber Reinforced Geopolymer Composites, in Strategic Materials and Computational Design, edited by Waltraud M. Kriven, Yanchun Zhou and Miladin Radovic. *Cer. Eng. Sci. Proc.* 31(10), 57-69.
- Rittmann, A.L., (1976). *Volcanoes*. Orbis Publishing, London.
- Rüscher, C. H., Mielcarek, E., Lutz, W., Ritzmann, A. and Kriven, W. M. (2010). Weakening of Alkali-Activated Metakaolin during Aging Investigated by the Molybdate Method and Infrared Absorption Spectroscopy, *J. Amer. Ceramic Society*, 93(9), 2585-2590.
- Ryu S.G., Lee Y.B., Koh K.T. ve Chung Y.S. (2013), The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Construction and Building Materials*, 47, 409-418.
- Samuel, D. M., Sutrisno, A., & Kriven, W. M. (2021). Relative importance of Al(V) and reinforcement to the flexural strength of geopolymer composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(7), 3452-3460.
- Sindhunata S. (2006), A conceptual model of geopolymerisation PHD thesis, University of Melbourne.
- Somna K., Jaturapitakkul C., Kajitvichyanukul P. ve Chindaprasirt P. (2011), NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Fuel*, 90, 2118-2124.
- Subaer and van Riessen, A. (2006). Thermo-mechanical and microstructural characterisation of sodium-poly(silicate-siloxo) (Na-PSS) geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3117–3123.
- Swaadle T.W. (2001). Silicate Complexes of Aluminum (III) in Aqueous Systems *Coord. Chem. Rev.*, 221, 665-686.
- Szabó, R., Gombkötö, I., Svéda, M., & Mucsi, G. (2017). Effect of grinding fineness of fly ash on the properties of geopolymer foam. *Archives of Metallurgy and Materials, Arch. Metall. Mater.* 62(2017), 2B, 1257-1261.

Watchman, J.B., (1996), *Mechanical Properties of Ceramics*, John Wiley & Sons Inc., 605 Third Avenue, New York, ISBN: 0-471-13316-7.

Xu H., J.S.J. van Deventer (2003). The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 216(1-3), 27-44

Xu, H. and Van Deventer, J.S.L., Lukey, G.C. (2001). The Effect of Alkali Metals on the Preferential Geopolymerisation of Stilbite/Kaolinite Mixtures, *Indian Engineering Chemistry Research*, 40(17), 3749-3756.

Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Zhang Z., Wong Y. C, Arulrajah A., Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*, 188(2018) 1101–1118.

Živica, V., Balkovic, S. and Drabik, M. (2011). Properties of metakaolin geopolymer hardened paste prepared by high-pressure compaction, *Construction and Building Materials* 25, 2206-2213.

