

**UÇUCU KÜL ESASLI GEOPOLİMER KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Cansu KURTULUŞ

Danışman

Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2021

Bu tez çalışması 19.FEN.BİL.01 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi ve  
218M778 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**UÇUCU KÜL ESASLI GEOPOLİMER KÖPÜK BETON**  
**ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Cansu KURTULUŞ**

**Danışman**

**Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Mayıs 2021**

## TEZ ONAY SAYFASI

Cansu KURTULUŞ tarafından hazırlanan “Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Köpük Beton Özelliklerinin Geliştirilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 21/05/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği **Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

**İmza**

**Başkan** : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi .....

**Üye** : Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi .....

**Üye** : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi .....

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ERGÜN  
Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi .....

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Sevgi ÇETİNTAŞ  
Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu .....

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... /..... /..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**21 / 05/ 2021**

**Cansu KURTULUŞ**

## ÖZET

Doktora Tezi

### UÇUCU KÜL ESASLI GEOPOLİMER KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Cansu KURTULUŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

Geopolimer teknolojisi, çimento ve çimento esaslı üretilen yapı malzemelerine alternatif olacağı düşünülen ve giderek popülerlik kazanan bir alandır. Özellikle uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi endüstride bol miktarda ortaya çıkan atıkların geri dönüşümünü sağlayabilen ve döngüsel ekonomiye katkı sağlayan bir yöntem olması sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında da her yıl milyonlarca ton açığa çıkan uçucu külün geopolimer köpük beton üretiminde kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma kapsamında deney tasarımı programı aracılığıyla 54 farklı reçete oluşturulmuş, uçucu kül miktarının, molaritenin, kürlenme sıcaklığının, kalsiyum stearat miktarının, hidrojen peroksit miktarının ve perlit miktarının geopolimer köpüğün mekanik ve fiziksel özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Geopolimer teknolojisinin gelişmesinin önündeki en büyük engellerden biri olan kuruma büzülmesinin, katkı olarak kullanılan kalsiyum stearat ile azaltılabildiği önemli bulgular arasındadır. Homojen köpük dağılımının sağlandığı ve gözenek boyutlarının kolaylıkla kontrol edilebildiği bu çalışmada  $350\text{kg/m}^3$  yoğunluk değerinde,  $>1.0$  MPa mukavemete sahip olan ve  $0.089\text{W/mK}$  ısı iletkenlik değerine sahip olan geopolimer köpük beton üretilmiştir.

**2021, xiv + 178 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Köpük, Geopolimer, Isı Yalıtımı, Uçucu Kül, Perlit, Porozite

## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### **DEVELOPMENT OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER FOAM CONCRETE PROPERTIES**

Cansu KURTULUŞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Science and Engineering

**Supervisor:** Prof. M. Serhat BAŞPINAR

Geopolymer technology is an area that is considered to be an alternative to cement and cement-based building materials and is increasingly popular. It comes to the fore, especially because it is a method that can provide the recycling of wastes that occur in large quantities in the industry, such as fly ash and blast furnace slag, and contribute to the circular economy. In this thesis, the potential of fly ash, which is released every year in millions of tons of geopolymer foam concrete, has been investigated. Within the research scope, 54 different recipes were created through the experimental design program, and the effects of fly ash amount, molarity, curing temperature, calcium stearate amount, hydrogen peroxide amount and perlite amount on the mechanical and physical properties of geopolymer foam were investigated. It is among the crucial findings that drying shrinkage, which is one of the biggest obstacles developing geopolymer technology, can be reduced with calcium stearate used as an additive. In this study, where homogeneous foam distribution was ensured, and the pore sizes could be easily controlled, geopolymer foam concrete with  $350\text{kg/ m}^3$  density value,  $> 1.0$  MPa strength, and  $0.089\text{W/mK}$  thermal conductivity was produced.

**2021, xiv + 178 pages**

**Keywords:** Foam, Geopolymer, Heat Insulation, Fly Ash, Perlite, Porosity

Canım Ailem'e ve Biricik Eşim'e...

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını 19.FEN.BİL.01 numaralı proje ile destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi ve 218M778 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı ve her zaman bir çok konuda fikirleri ve hayat görüşü ile yolumu aydınlatan çok kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR'a,

Her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını ve iyi niyetlerini gördüğüm değerli hocalarım Prof. Dr. Şükrü TALAŞ ve Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN'a,

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü çatısı altında doktora çalışmalarımı yürütmem için bana destek olan ve bölüm imkanlarını sonuna kadar açarak beni destekleyen çok kıymetli hocalarım Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN, Prof. Dr. Şükrü TALAŞ ve danışmanım Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR'a,

Tez çalışmamın mukavemet analizlerinin yapılmasında bana her zaman yardımcı olan çok kıymetli hocam Prof. Dr. İsmail DEMİR'e ve Arş. Gör. Erhan KAHRAMAN'a,

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, maddi-manevi desteklerini hissettiğim, yanıbaşlarında huzur bulduğum, her zaman tüm kalbimle varlığını hissettiğim melek anneciğim, canım babacığım ve canımın yarısı kardeşime,

Ve son olarak sabrı, anlayışı ve desteği için; her konuda olduğu gibi tez çalışmalarımda da tüm zorlukları benimle paylaştığı için, her günüme yeni bir umut olduğu için şükür sebebim biricik eşim Recep KURTULUŞ'a,

Sonsuz teşekkür, sevgi ve saygılarımla.

Cansu KURTULUŞ  
Afyonkarahisar, 2021



## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Önemi .....	3
1.2 Araştırma Kapsamı .....	4
1.3 Amaç ve Hedefler .....	5
1.4 Tezin Organizasyonu .....	5
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	6
2.1. CO <sub>2</sub> Emisyonu ve Çevresel Konular .....	6
2.2 Yapı Malzemeleri için Alternatif-Uçucu Kül.....	7
2.2.1 Türkiye ve Dünyada Uçucu Kül .....	7
2.2.2 Uçucu Kül'ün Geri Kazanımının Önemi .....	10
2.3 Geopolimer .....	12
2.3.1 Geopolimer Bileşenleri .....	16
2.3.1.1 Metakaolen.....	16
2.3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu .....	18
2.3.1.3 Uçucu Kül .....	18
2.3.1.4 Uçucu Külün Geopolimerleşme Mekanizması .....	21
2.3.2 Geopolimer Kullanım Alanları .....	27
2.3.3 Geopolimerlerin Teknolojik Sınırlamaları.....	28
2.3.3.1 Kuruma Büzülmesi .....	28
2.3.3.2 Çiçeklenme.....	38
2.3.4 Köpük Geopolimer .....	39
2.3.2.1 Köpük Geopolimer Üretimi .....	43
2.4 Geopolimer Özelliklerini Etkileyen Faktörler .....	49
2.4.1 Molarite.....	49
2.4.2 SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Oranı .....	50

2.4.3 Kürlenme Sıcaklığı ve Süresi .....	51
2.5 Binalarda Isı Yalıtımı .....	51
2.5.1 Isı Yalıtım Malzemeleri .....	53
2.5.2 Isı İletim Mekanizması .....	55
2.6 Deney Tasarımı.....	59
2.7. İstatistiksel Analizler .....	62
2.7.1 Regresyon Analizi ve Çok Değişkenli Regresyon.....	62
2.7.2. Basit ve Kısmi Korelasyon .....	63
3. MATERYAL VE METOT .....	66
3.1 Hammaddeler.....	66
3.1.1 Alüminosilikat İçerikli Hammaddeler .....	66
3.1.2 Sodyum Silikat.....	67
3.1.3 Sodyum Hidroksit .....	68
3.1.4 Genleştirilmiş Perlit .....	68
3.1.5 Polipropilen Fiber .....	68
3.1.6 Hidrojen Peroksit .....	69
3.1.7 Kalsiyum Stearat.....	69
3.1.8 Sperplastikleştirici .....	69
3.2 Numune retim Sürecine Hazırlık alışmaları.....	69
3.3 Test ve Analizler.....	76
3.3.1 Mukavemet .....	76
3.3.2 Yoğunluk .....	77
3.3.3 Kuruma Büzülmesi .....	77
3.3.4 Isıl İletkenlik .....	78
3.3.5 Çiçeklenme Analizi.....	79
3.3.6 Kılcallık ile Su Emme Analizi .....	79
3.3.7 Kıvam Analizi.....	80
3.3.8 Civa Porozimetresi.....	81
3.3.9 XRD .....	81
3.3.10 Taramalı Elektron Mikroskobu.....	81
3.3.11 Image-J Programı ile Gözenek Analizi.....	81
3.3.12 FTIR.....	82
4. BULGULAR .....	83
4.1 Mekanik zellikler .....	84

4.2 Fiziksel Özellikler .....	88
4.2.1 Yoğunluk .....	88
4.2.2 Çiçeklenme Davranışı.....	91
4.2.3 Kuruma Büzülmesi .....	94
4.2.4 Kılcallık .....	98
4.3 Termal Özellikleri.....	100
4.4 Mikroyapı Özellikleri, Gözenek Yapısı ve Mineralojik Analiz .....	103
4.4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu.....	103
4.4.2 Gözeneklerin Image-J ile Analiz Edilmesi .....	111
4.4.3 Gözeneklerin Civa Porozimetresi ile Analizi .....	115
4.4.4 EDS Analizi .....	121
4.4.5 XRD Analizi .....	128
4.5 FTIR Analizi.....	129
4.6 Karışım Özellikleri .....	132
4.6.1 Kıvam.....	132
4.7 Maliyet Analizi .....	138
4.8 Bulguların İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi ve Uygun Çalışma Aralıklarının Belirlenmesi.....	139
4.8.1 Geopolimer Köpüklerin Mukavemet Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi.....	140
4.8.2 Geopolimer Köpüklerin Yoğunluk Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi .....	142
4.8.3 Geopolimer Köpüklerin Kuruma Büzülmesi Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi .....	146
4.8.4 Geopolimer Köpüklerin Termal İletkenlik Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi .....	148
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	152
6. KAYNAKÇA .....	158
ÖZGEÇMİŞ.....	177

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

$\nabla T$	Sıcaklık gradyanı
$^{\circ}C$	Santigrat derece
$\mu$	Dinamik viskozite
$\mu m$	Mikrometre
$a$	Termal yayılım
$A$	Yüzey alanı
$\text{Å}$	Angstrom ( $10^{-10}m$ )
$Al$	Alüminyum
$Ca$	Kalsiyum
$CaO$	Kalsiyum oksit
$CO$	Karbon monoksit
$CO_2$	Karbon dioksit
$Cs$	Sezyum
$C_p$	Spesifik Isı
$d_{1,2}$	Çap
$Fe$	Demir
$G$	Grashof sayısı
$g$	Yer çekimi ivmesi
$g$	Gram
$H_2O$	Hidrojen monoksit (Su)
$H_2O_2$	Hidrojen peroksit
$K$	Potasyum
$kg$	Kilogram
$Kn$	Knudsen ortalama serbest yolu
$l$	Hücre boyu
$L$	Boyutsuz parametre
$l_0$	İlk boy
$lt$	Litre
$m$	Metre
$Mg$	Magnezyum
$M_{kuru}$	Kuru ağırlık
$ml$	Mililitre
$Na$	Sodyum
$Na_2O$	Sodyum oksit
$NaOH$	Sodyum hidroksit
$nm$	Nanometre
$NO_x$	Nitrojen oksitler
$O$	Oksijen
$p$	Anlamlılık düzeyi

---

## Simgeler (Devam)

---

q	birim zamanda birim alanda yayılan ısı miktarı
Q	Emilen su hacmi
r	Korelasyon katsayısı
R <sup>2</sup>	Determinasyon katsayısı
S	Kılcallık katsayısı
Si	Silisyum
t	Zaman
T	Sıcaklık
TL	Türk lirası
V	Hacim
$\alpha$	Stefan sabiti
$\beta$	Gaz için genleşme katsayısı
$\beta$	Standardize edilmiş regresyon katsayısı
$\Delta l$	Boy değişimi
$\Delta T_c$	Bir hücre boyunca oluşan sıcaklık farkı
$\lambda$	Termal iletkenlik
$\rho$	Malzemenin yoğunluğu

## Kısaltmalar

---

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BBT	Box Bhenken Tasarımı
BET	Brunauer, Emmet ve Teller
EN	Avrupa Standartları Komitesi
DM	Doehler Matrisi
EDS	Enerji yayımlımlı X-Işını Analizi
EPS	Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük
FTIR	Fourier Dönüşüm Kızılötesi
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
IUPAC	Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
MAS NMR	Katı hal NMR spektroskopisi
MIP	Civa Porozimeresi
MK	Metakaolen
MPa	Megapaskal
SCOPUS	Blimsel makale veri tabanı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS EN	Türk Standardı Avrupa Normları
UK	Uçucu Kül
XPS	Ekstrude Polistren
XRD	X Işınları Difraktometresi
YFC	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Turner ve Collins'in CO <sub>2</sub> emisyonu ile ilgili yapmış oldukları detaylı analizi.	7
Şekil 2.2 Yakıt türüne göre birincil enerji tüketimi. ....	8
Şekil 2.3 Türkiye'de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı. ....	9
Şekil 2.4 Geopolimerleşme için kabul edilen kavramsal model .....	13
Şekil 2.5 Uçucu külün geopolimerleşmesinin tanımlayıcı modeli .....	22
Şekil 2.6 Geopolimerin mikrokimyasal gelişimi .....	23
Şekil 2.7 Çekirdeklendirilmemiş geopolimer sentezinin şematik diyagramı.....	25
Şekil 2.8 Çekirdeklendirilmiş geopolimer sentezinin şematik diyagramı.....	26
Şekil 2.9 Boyutlarına göre gözeneklerin sınıflandırılması.....	28
Şekil 2.10 Agrega dispersiyon modeli. ....	37
Şekil 2.11 Geopolimer köpükler ile ilgili yapılan yayın sayılarının gösteren SCOPUS verileri.....	40
Şekil 2.12 Köpük oluşturucu katkılarla hazırlanan geopolimer köpüklere ilişkin bazı resimler .....	46
Şekil 2.13 Gözenekli bir katının şematik kesiti .....	52
Şekil 2.14 Ticari yalıtım malzemeleri ve köpük geopolimeri için yoğunluk ve termal iletkenlik .....	55
Şekil 2.15 Gaz halindeki termal iletkenlik üzerinde Knudsen etkisi. ....	59
Şekil 2.16 BBT küpü .....	61
Şekil 3.1 Hammaddelerin XRD sonuçları.....	67
Şekil 3.2 Yüksek fırın cürufu içeren numunelerde yaşanan sorunlar.....	71
Şekil 3.3 Uçucu kül esaslı numunelerin rötre için hazırlanan prizmatik numuneleri.....	71
Şekil 3.4 Tamamen uçucu kül ile hazırlanan numunelerde gözlemlenen çökme ve çatlama problemleri. ....	72
Şekil 3.5 Deney planı. ....	75
Şekil 3.6 Laboratuvar Çalışmaları sırasında hazırlanan numuneler.....	76
Şekil 3.7 Prizma kuruma büzülmesi kalıpları .....	78
Şekil 3.8 Sıcak levha yöntemi ile ısı iletkenlik analizi yapılmak üzere hazırlanan 30x30x5cm numuneler .....	79
Şekil 3.9 Yüzeyleri parafin ile kaplanan numuneler ile kılcallık analizi. ....	80

<b>Şekil 4.1</b> Kontur grafiklerinin analiz edilmesi. ....	83
<b>Şekil 4.2</b> Mukavemet değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle	87
<b>Şekil 4.3</b> Yoğunluk değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle....	90
<b>Şekil 4.4</b> Tek yüzeyleri su ile temas haline tutulan geopolimer numuneleri. ....	92
<b>Şekil 4.5</b> Geopolimer yüzeyinden toplanan çiçeklenmenin XRD analizi. ....	93
<b>Şekil 4.6</b> Geopolimer kompozisyonlarının içerdiği uçucu kül-metakaolen miktarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analizi .....	94
<b>Şekil 4.7</b> Geopolimer kompozisyonlarının molaritesine göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analizi.....	95
<b>Şekil 4.8</b> Geopolimer kompozisyonlarının kürlenme sıcaklıklarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analizi .....	96
<b>Şekil 4.9</b> Geopolimer kompozisyonlarının kalsiyum stearat miktarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analizi .....	97
<b>Şekil 4.10</b> Geopolimer kompozisyonlarının perlit miktarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analizi.....	98
<b>Şekil 4.11</b> Numunelerin kapiler zamana bağlı kapiler su emme miktarlarının incelenmesi. ....	100
<b>Şekil 4.12</b> Geopolimer köpük numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin analiz edilmesi. ....	102
<b>Şekil 4.13</b> Değişken kalsiyum stearat içeriği ve molaritesi olan uçucu kül esaslı geopolimer köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	104
<b>Şekil 4.14</b> Değişken kalsiyum stearat içeriği ve molaritesi olan uçucu kül esaslı geopolimer köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	105
<b>Şekil 4.15</b> Geopolimer numunelerin yüksek büyütmedeki görüntüsü. ....	105
<b>Şekil 4.16</b> Geopolimer kompozisyonundaki perlit görüntüsü.....	106
<b>Şekil 4.17</b> Fiber takviyesinin geopolimer köpük kompozisyonundaki görüntüsü. ....	108
<b>Şekil 4.18</b> Numunelerde oluşan iğnemsî yapıların görüntüsü.....	109
<b>Şekil 4.19</b> Uçucu kül miktarının mikroyapıya etkisinin incelenmesi .....	111
<b>Şekil 4.20</b> Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin Image-J programı yardımıyla incelenmesi.....	112
<b>Şekil 4.21</b> Köpük geopolimer örneklerinin gözenek boyutu dağılımı. ....	116

<b>Şekil 4.22</b> Cıva porozimetresi ile ölçülen köpük geopolimer numunelerinin gözenek spesifik yüzey alanları .....	117
<b>Şekil 4.23</b> Mürekkep şişesi gözeneğini bağlayan boğaz gözenekli bir gözenek sisteminde cıva porozimetresi analizi.....	119
<b>Şekil 4.24</b> Cıva porozimetresi basınçlandırma-basınçsızlaştırma sırasında gözlemlenen histerizis.....	120
<b>Şekil 4.25</b> Mikroyapı oluşumu .....	121
<b>Şekil 4.26</b> Köpük numunelerin EDX yardımıyla incelenmesi. ....	125
<b>Şekil 4.27</b> Taramalı elektron mikroskopunda görülen iğnemsyapıların EDS analizi. ....	127
<b>Şekil 4.28</b> Karışım molaritesinin X ışınları analizine etkisi .....	128
<b>Şekil 4.29</b> Kürlenme sıcaklığının ve uçucu kül miktarının X ışınları analizine etkisi .....	129
<b>Şekil 4.30</b> Geopolimer köpük kompozisyonlarının FTIR incelemeleri. ....	131
<b>Şekil 4.31</b> Geopolimer karışımlarının akış sürelerinin belirlenmesi. ....	133
<b>Şekil 4.32</b> Geopolimer karışımlarının kıvamlarının analiz edilemsi.....	134
<b>Şekil 4.33</b> Geopolimer karışımlarının akış sürelerinin verilerinin Minitab19 programı aracılığıyla analizi.....	135
<b>Şekil 4.34</b> Geopolimer karışımlarının yayılma çapı verilerinin Minitab19 programı aracılığıyla analiz.....	137
<b>Şekil 4.35</b> Geopolimer ham madde üretim ölçütleri ve hata çubukları .....	139
<b>Şekil 4.36</b> Mukavemet üzerinde en etkili faktörlerin üçlü grafiklerde sunulması ve çalışma aralığı tespiti.....	142
<b>Şekil 4.37</b> Yoğunluk değerleri üzerinde en etkili faktörlerin üçlü grafiklerde sunulması ve çalışma aralığı tespiti.....	144
<b>Şekil 4.38</b> Yoğunluk değerlerinin mukavemet değerleri ile ilişkilendirilmesi.....	145
<b>Şekil 4.39</b> Kuruma büzülmesi değerlerinin mukavemet ile ilişkilendirilmesi.....	148
<b>Şekil 4.40</b> Termal iletkenlik değerleri üzerinde en etkili faktörlerin üçlü grafiklerde sunulması ve çalışma aralığı tespiti.....	150



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 2.1</b> Türkiye’de bulunan termik santraller.....	10
<b>Çizelge 2.2</b> Geopolimer malzemelerin Si/Al oranına göre kullanım alanları. ....	14
<b>Çizelge 2.3</b> Geopolimer köpük alanında yayımlanan önemli yayınlar. ....	41
<b>Çizelge 3.1</b> Hammaddelerin kimyasal kompozisyonları.....	66
<b>Çizelge 3.2</b> Hammaddelerin yoğunluk ve yüzey alanı ölçümleri. ....	66
<b>Çizelge 3.3</b> Sodyum silikatın kimyasal analizi. ....	68
<b>Çizelge 3.4</b> Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren kompozisyonlar. ....	70
<b>Çizelge 3.5</b> Deney tasarımında kullanılan maksimum ve minimum değerler. ....	73
<b>Çizelge 3.6</b> Minitab19 programı aracılığıyla hazırlanan reçete bilgileri.....	74
<b>Çizelge 4.1</b> Çiçeklenme analizi için seçilen numuneler.....	91
<b>Çizelge 4.2</b> Kılcallık analizi yapılan numune reçetelerine ilişkin bilgiler. ....	99
<b>Çizelge 4.3</b> SEM ve EDX yardımıyla incelenen köpük umunelerin kompozisyonları	103
<b>Çizelge 4.4</b> Image-J ile incelenen numunelerin gözenek boyutu verileri. ....	115
<b>Çizelge 4.5</b> Civa porozimetresi ile gözenek analizi yapılan numune reçetelerine ilişkin bilgiler.....	115
<b>Çizelge 4.6</b> Civa porozimetrisi ile ölçülen köpük geopolimerlerinin gözenek özellikleri .....	117
<b>Çizelge 4.7</b> Uçucu kül esaslı köpük numunelerin kompozisyonlarının EDX yardımıyla analiz edilmesi. ....	126
<b>Çizelge 4.8</b> Taramalı elektron mikroskopunda gözlemlenen iğnemsî yapıların EDS analizleri. ....	128
<b>Çizelge 4.9</b> Akışkanlık ve yayılma testi için hazırlanan reçeteler. ....	132
<b>Çizelge 4.10</b> Geopolimer çamurunun kıvam analizi için hazırlanan kompozisyon ve geopolimer .....	133
<b>Çizelge 4.11</b> Hammaddelerin fiyatları .....	138

<b>Çizelge 4.12</b> Mukavemet üzerinden etkili olduğu düşünölen düşünölen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi .....	140
<b>Çizelge 4.13</b> Yoğunluk üzerinde etkili olduğu düşünölen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi.....	143
<b>Çizelge 4.14</b> Kuruma büzümesi üzerinde etkili olduğu düşünölen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi.....	147
<b>Çizelge 4.15</b> Termal iletkenlik üzerinde etkili olduğu düşünölen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi.....	149

## 1. GİRİŞ

Enerji, kaynak ve çevre krizleri 21. yüzyıl başladığından beri küresel ölçekte sorun haline gelmiştir. Bu sebeple; çevre koruma, enerji tasarrufu, emisyon azaltma, atık geri dönüşümü ve yeni enerji kaynakları geliştirme gibi konular gezegenimizin sürdürülebilir gelişimi için küresel bir fikir birliği haline gelmiştir. Binalarda sağlanacak olan enerji tasarrufu, enerji tasarrufu ve emisyon azaltmanın en önemli basamaklarından biridir ve bina enerji verimliliğini artırmanın en etkili yolu, ısı yalıtım malzemeleri kullanmaktır.

İnşaat sektöründe son yıllarda görülen hızlanma, kullanılacak yapı malzemelerinin teknik yönden üstün parametre ve değerlere sahip olmalarının gerekliliğine, birçok yeni yapı malzemelerinin araştırılmasına ışık tutmaktadır (Davidovits 1994, İnt. Kyn. 1). Özellikle günümüzde yaşanan fosil enerji kaynaklarının hızla tüketimi, sera gazının sebep olduğu hava kirliliği, enerji kullanım miktarını en aza indirilme çabası, üretilen malzemelerin doğru ve yerinde kullanılmaması gibi sebeplerle ortaya çıkan sürdürülebilirlik kavramı yeni nesil malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine zemin oluşturmaktadır. Bu sebeptendir ki çimentodan ziyade düşük sera gazı emisyonuna sahip ve sürdürülebilirliği etkileyecek yeni inşaat malzemeleri ile ilgili çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Özellikle son çeyrek asırda artan çevresel bilince paralel olarak ulusal ve uluslararası çevresel politikalar giderek katılaşmaktadır. Her yıl tüketilen milyarlarca ton çimento ürünü de bu bağlamda göze batmakta ve bu çerçevede mercek altındadır. Bu yüzden minimum işlenmiş hammaddeler ve atık-yan ürün olarak değerlendirilebilecek hammaddelerin yapı malzemesi kapsamında değerlendirilme potansiyelinin araştırılması önemli bir konudur (İnt. Kyn. 2). Tüm bu bilgilerden yola çıkılarak termik santral atığı olan uçucu külün döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilerek, yapı sektöründe kullanılma potansiyeli olan alternatif bir hammadde olarak değerlendirilmesi bu tezin konusu olarak belirlenmiştir.

Farklı sanayi alanlarının hızla büyümesi, çimento ve diğer doğal kaynakların tüketimini ne yazık ki fazlasıyla arttırmıştır. Beton ve çimento sektörü gerek fazla miktarda doğal kaynak ve enerji tüketmesi, gerekse çimento üretimi kaynaklı başta CO<sub>2</sub> olmak üzere NO<sub>x</sub> gibi emisyonların yüksek miktarda salınımına sebep olması ve solunduğunda solunum yollarını ciddi oranda etkileyen partikül maddelerin oluşumuna sebep olması nedeniyle sıklıkla eleştirilmektedir (Dhivya 2016). Başka bir açıdan bakıldığında inşaat sektöründe bina ve kaldırım yapımında ihtiyaç duyulan çimento ve agregaların sağlanabilmesi amacıyla birçok

nehir yatağı tahrip edilmekle birlikte, doğal dengenin de bozulmasına sebep olunmaktadır. Hem emisyon hem de çevre tahribi konusunda yapılan eleştiriler yapı sektörünü alternatif hammadde arayışına zorlamaktadır. Çimento temelli sistemlerde (sıva, harç, beton gibi); uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların kullanımı ile karbondioksit emisyonu minimize edilebilmekte, doğal kaynaklar ile enerjiye olan gereksinim azalmaktadır. Uçucu kül gibi atıkların geopolimer teknolojisi sayesinde yapı malzemesi olarak kullanılma potansiyelinin bulunması, geopolimer malzemeleri ön plana çıkmaktadır. Avrupa topluluğunun ise çevrenin korunması ve kalitesinin geliştirilmesi ile ilgili belirlemiş olduğu hedefler arasında 2030 yılına kadar emisyonun %40 oranında, 2050 yılına kadar ise %80 oranında azaltılması ve enerji verimliliğinin en az %32.5 oranında artırılması hedefleri, geopolimer teknolojisinin yaygınlaştırılması ve bu teknolojide karşılaşılan problemlerin çözülmesine itici güç olmakla birlikte, yapılacak olan tez çalışmasının önemini vurgular niteliktedir.

Geopolimer beton, inorganik moleküllerin oluşturduğu uzun zincirler ve ağlar yardımıyla oluşan portland çimentolu beton ürünlerine alternatif bir malzemedir. Davidovits, Si ve Al yönünden zengin herhangi bir toz malzemenin hammadde olarak kullanılabileceğini belirtmiştir (Davidovits 2008).

Açıkça bilinmektedir ki, ekonomik ölçekte büyümekte olan ülkelerin enerji tüketimleri de giderek artmaktadır. Gelişmekte olan ülkemiz de enerjisinin büyük kısmını hala katı fosil yakıtlar sayesinde termik santrallerden karşılamaktadır. Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak artan kömür tüketimi, atık olarak elde edilen kül miktarının da artmasına neden olmaktadır. Termik santrallerde 1kWh enerji üretimi sonucu 110g uçucu kül atığı ortaya çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Türkiye'deki termik santrallerde elde edilen atığın toplam yıllık miktarı yaklaşık 20 milyon tondur. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir. Özellikle teknolojik ve ekonomik değeri yüksek olan uçucu kül, farklı alanlarda kullanılmaya çalışılsa da bu oran oldukça çok düşük kalmaktadır. Hem yeni ve çevre dostu yapı malzemelerinin üretilme çabası, hem de uçucu kül gibi atık ürünlerin değerlendirilmesi için uğraşlar bu iki problemi aynı paydada buluşturmaktadır. Atıkların kütleli olarak tüketimi için en uygun alan yapı malzemeleridir. Uçucu külün alüminosilikat içermesi ve geopolimerleşebilme özelliğinin bulunması sebebiyle bu atığın katma değeri

yüksek ürünlere çevrilmesi önemli bir akademik çalışma alanıdır. Uçucu kül esaslı geopolimerler alanında dünya çapında birçok çalışma yürütülüyor olmasına rağmen, hala geliştirilmeye açık yönlerinin bulunması ve bu teknolojiye verilen önem nedeniyle, geopolimerlerin yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar çok fazla değer görmektedir.

Binalardaki enerji kaçakları göz önünde bulundurulduğunda ısı kaybının yaklaşık %40'ının duvarlar sebebiyle olduğu bilinmektedir. Binalarda duvar elemanı olarak kullanılan tuğla, bims blok ve gazbeton ısı yalıtımı yönünden değerlendirildiğinde, gaz beton haricindeki yapı malzemelerinin yalıtım özelliğinin bulunmadığı görülmektedir. Bu sebeple kullanılan malzemeye ek olarak EPS, XPS, cam yünü, taş yünü gibi yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Bu da ek maliyet anlamına gelmektedir. Ayrıca yangın dayanımlarının çok düşük olması sebebiyle ve yangın sırasında çıkan gazın canlıların zehirlenerek ölümüne neden olmasından dolayı bu tür yalıtım malzemelerinin kullanılmaması önerilmektedir. Gaz beton ise A1 sınıfı yanma dayanımı olmasına ve ısı yalıtımı sağlamasına rağmen, üretim yöntemi neticesinde pahalı bir yapı malzemesi olması sebebiyle kullanımda tercih edilirdiği hala çok düşüktür. Bu sebeple binalarda sıklıkla kullanılan bu yapı ve yalıtım malzemelerine alternatif olarak ucuz, ısı yalıtımlı, yangına dayanıklı ve hafif malzeme arayışı sürmektedir. Bu bağlamda geopolimer köpükler hafiflikleri, düşük üretim maliyetleri, yangın dayanımları ve yalıtım özellikleri sayesinde ön plana çıkmaktadır. Binalardaki ortalama yükün %15-25'ini oluşturan yük taşımayan duvarların hafifletilmesi de ölü yükün azaltılarak deprem güvenliğinin sağlanması açısından önem arz etmektedir. Yapılan tezin ana hedefinde de bahsi geçen ve yaygın olarak yapı malzemesi olarak kullanılan malzemelere alternatif olarak atıkların geri dönüşümüne imkan sağlayarak, çevreci bir yaklaşım ile düşük maliyetli, yangın dayanımlı, ısı yalıtım özelliği bulunan ve hafif yapı malzemesi geliştirilmesi ve halen uçucu kül esaslı geopolimer köpüklerin üretim esnasında ve üretim sonrasındaki problemlerine çözüm yolu geliştirmektir.

## **1.1 Çalışmanın Önemi**

Geopolimer malzemeler ile ilgili, farklı alüminosilikat kaynakları kullanarak geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmış ve bu malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül esaslı geopolimerler, termik santrallerin atıklarının kütleli olarak

tüketimi ve portland çimentosuna alternatif olma potansiyeli açısından önemli bir çalışma alanıdır. Uzun yıllardır devam eden çalışmalara rağmen halen uçucu kül esaslı geopolimerlerin oluşum mekanizması tam anlamıyla açıklanamamakla birlikte, kuruma büzülmesi, çiçeklenme, çatlama problemleri gibi sorunlarına hala kesin çözüm bulunamamıştır. Bu sebeple geopolimer teknolojisinin hala geliştirmeye açık birçok yönü bulunmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı;

- 1) Uçucu küllerin yapı malzemeleri alanında değerlendirilmesini sağlayarak döngüsel ekonomiye katkı sağlamak,
- 2) Uçucu kül bazlı köpük beton gelişimini sağlamak ve tuğla, bims blok, gazbeton gibi yapı malzemelerine alternatif ısı yalıtım özelliği bulunan yapı malzemesi geliştirmek,
- 3) Uçucu kül esaslı geopolimerlerin kuruma büzülmesi, çiçeklenme ve çatlama gibi temel problemlerine çözüm yolu aramaktır.

Bu çalışma kapsamında; uçucu kül ve katkı olarak kullanılan metakaolen ve yüksek fırın cürufunun geopolimerleşme davranışına olan etkileri incelenmiş, hazırlanan reçetelerdeki farklılıkların mukavemet değerine olan etkisi gözlemlenmiş, karışım oranı, gözenek miktarı, mukavemet değerleri arasındaki ilişki kurulmuş, kılcallık, kıvam (yayımla ve akış) testleri yapılmış ve birbirleriyle ilişkilendirilmiştir.

## **1.2 Araştırma Kapsamı**

Alüminosilikat hammaddesi olarak F tipi (düşük kalsiyumlu) uçucu kül, metakaolen ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Araştırmalar süresinde Box-Behnken deneysel tasarımı kullanılmış ve molarite, kürlenme sıcaklığı, uçucu kül-metakaolen oranı, perlit miktarı, kalsiyum stearat miktarı ve hidrojen peroksit miktarı olmak üzere üç farklı seviyede (minimum, ortalama ve maksimum) altı farklı değişken için çalışılmış, elli dört farklı reçete ile bu reçetelere uygun numuneler hazırlanmıştır. Deney tasarımında maksimum ve minimum olarak seçilen değerler ön çalışmalarda belirlenmiştir. Hazırlanan numunelerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri incelenmiş, bulunan sonuçlar SPSS programı sayesinde istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

### 1.3 Amaç ve Hedefler

Bu çalışmadaki amaç tuğla, bims blok, gazbeton gibi yapı malzemelerine alternatif ısı yalıtım özelliği bulunan yapı malzemesi geliştirmektir. Bu doğrultuda TS 13655'te belirtildiği üzere 450-550kg/m<sup>3</sup> yoğunluk için  $\geq 1.0$  MPa mukavemet ve  $< 0.12$  W/mK ısı iletkenlik değerlerine uygun olacak şekilde geopolimer köpük geliştirilmesi hedeflenmiştir.

### 1.4 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır.

**Birinci bölüm;** bu tezin giriş bölümünü oluşturmaktadır. Giriş bölümünü bu çalışmanın önemi, çalışmanın amaç ve hedefleri, araştırma kapsamı ve tezin organizasyon planından oluşmaktadır.

**İkinci bölüm;** literatür bilgilerinden oluşmaktadır. Neden uçucu kül ile çalışma yapıldığının, neden yapı malzemelerinde çimento esaslı malzemeler yerine uçucu kül kullanımının giderek artma potansiyelinde olduğu sorularının yanıtları bu bölümde detaylıca açıklanmıştır. Ayrıca geopolimer kavramından, geopolimerizasyonu etkileyen faktörlerden detaylıca bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan deney tasarımına da detaylıca değinilmiştir.

**Üçüncü bölüm;** kullanılan hammaddelerden ve izlenen deneysel yöntemden detaylıca bahsetmektedir. Numune hazırlama esnasında yapılan kıvam analizinden, hazırlanan numunelerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklerinin analizinde kullanılan yöntemlerden ve sonuçlarından bahsetmektedir.

**Dördüncü bölüm;** tezin hazırlanmasında kullanılan altı farklı değişkenin ve değişkenlerde kullanılan faktör seviyelerinin fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklere olan etkisinden bahsetmekte ve verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile birlikte sonuçların tartışmasını içermektedir.

**Beşinci bölüm;** çalışmanın özeti ve sonuç bölümlerinden oluşmaktadır. Bu bölümde çalışmadaki önemli bulgulardan bahsedilmektedir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölümde geopolimer teknolojisinden, uçucu kül esaslı geopolimerlerden ve metakaolen, yüksek fırın cürufu gibi alüminosilikat minerallerinden bahsedilmiştir.

### 2.1. CO<sub>2</sub> Emisyonu ve Çevresel Konular

Geopolimer malzemelerin ön plana çıkabilmesi için her açıdan incelenmesi gerekmektedir. Yapı malzemelerinin üretimi aşamasında maliyetinin ve üretim metodunun yanı sıra göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konu CO<sub>2</sub> salınımıdır. Çimento sektörünün CO<sub>2</sub> dünya ölçeğinde salınımının yaklaşık %8'i gibi büyük bir oranından sorumlu olduğu vurgulanmakla birlikte, yapı sektörü çimentoya ve çimento içeriği ile hazırlanan gazbeton gibi yapı malzemelerine alternatif malzemelerin arayışı içerisinde (Hardjito 2005, Provis 2009, Puertas vd. 2008).

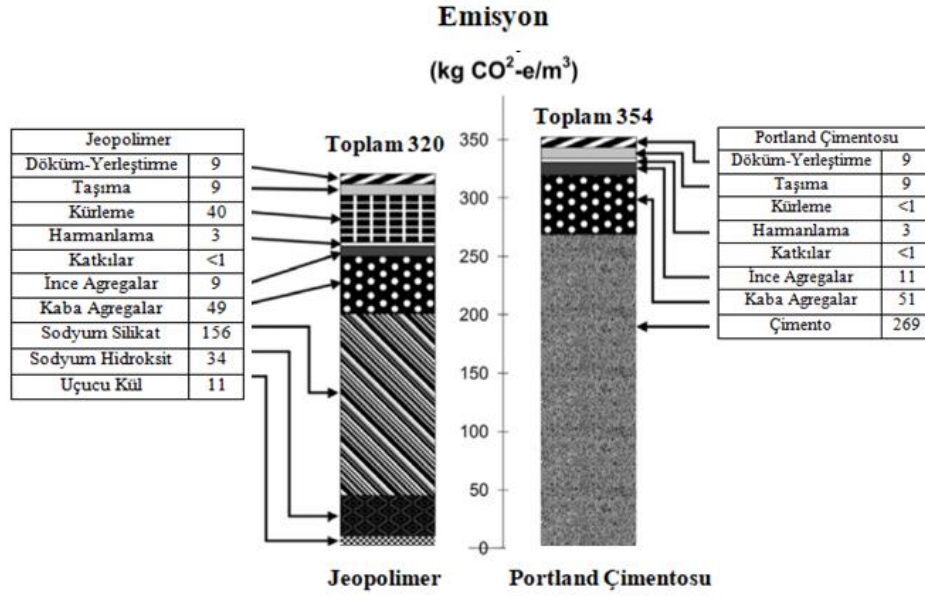
Geopolimer malzemeler üretim kolaylığının olması, atıkların geri dönüşümünü mümkün kılması alanlarında ön plana çıksa da, üretimleri esnasında alkali ortamı hazırlamak için kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit hem maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Weil vd. geopolimer malzemelerde hem maliyet artışına hem de CO<sub>2</sub> emisyonuna sebebiyet veren en önemli içeriğin sodyum silikat ve sodyum hidroksit olduğunu vurgulamışlardır (Weil vd. 2009).

Alkali silikatları, 1100°C ila 1200°C'de sodyum karbonat füzyonu sayesinde, SiO<sub>2</sub> ve Na<sub>2</sub>O içeren cam kırıntılarının bir reaktöre beslenmesi ve su ile karıştırılarak yüksek buhar basıncı ortamında çözünmesi sağlanarak hazırlanmaktadır. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak göstermiş olduğu özellikler değişmekle birlikte Na<sub>2</sub>O oranı değiştirilmek istendiğinde NaOH ilavesi yapılmaktadır (Anonim 2017). NaOH üretimi ise klor-alkali reaksiyonu ile yılda yaklaşık maksimum 60 metrik ton üretilmektedir. Bu miktarın arttırılması kolay değildir çünkü klor (Cl<sub>2</sub>) sınırlı dünya pazarına sahip olan bir yan üründür (Davidovits 2008).

Geopolimer malzemeler de emisyon açısından eleştirilseler de Duxson vd. yapmış oldukları çalışmada portland çimentosu ve geopolimerik malzemelerin CO<sub>2</sub> salınımını incelemiş ve portland çimentousunun %80 oranında daha fazla emisyonla sebep olduğunu ortaya koymuştur (Provis ve Van Deventer, 2009). Turner ve Collins de yapmış oldukları çalışmada tamamen normal portland çimentosu kullanılarak hazırlanan betonun, geopolimer betona göre %9 daha



fazla karbon ayak izine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Turner ve Collins 2013). Şekil 2.1’de Turner ve Collins’in CO<sub>2</sub> emisyonu ile ilgili yapmış oldukları detaylı analizi sunulmaktadır.



Şekil 2.1 Turner ve Collins’in CO<sub>2</sub> emisyonu ile ilgili yapmış oldukları detaylı analizi.

Joseph Davidovits ise yapmış olduğu çalışmada Turner ve Collins’in hesaplamalarının olması gerekenden fazla olduğunu gösterir nitelikte bir çalışma yapmıştır. Şekil 2.1’de verilen rakamsal değerler üzerinden giderek tekrar hesaplama yapmış ve geopolimer için hesaplanan 320 CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> değerinin aslında 169 CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> olduğunu belirtmiştir (Davidovits, 2015). Aynı zamanda Habert vd. (2011) de CO<sub>2</sub> emisyonu üzerine çalışmalar yapmış ve geopolimer emisyonunun olması gerekenden fazla hesaplandığını belirtmiştir.

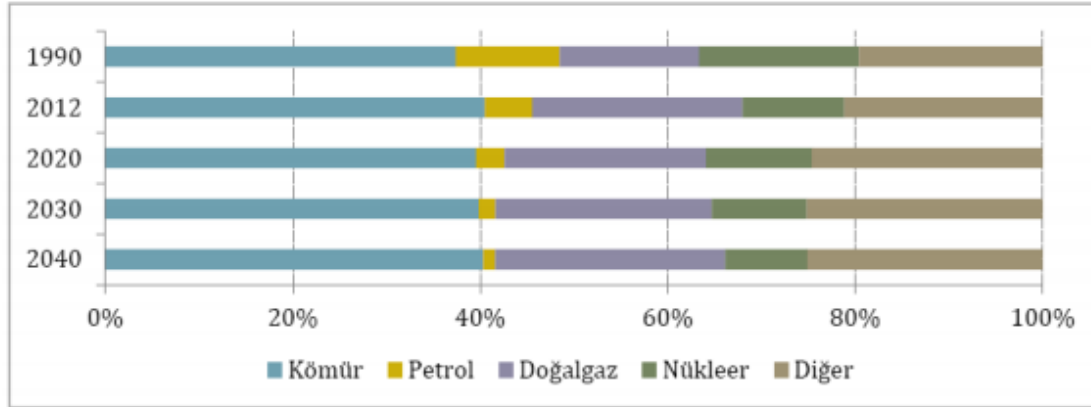
McLellan vd. geopolimer malzemelerin çimentonun aksine iklim değişikliğini hızlandıran CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık %44-64 arasında daha az olduğunu vurgulayan bir çalışma yapmışlardır (McLellan vd. 2011). Literatürdeki çimento ile geopolimerlerin emisyon değerlerinin karşılaştırıldığı çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, geopolimer teknolojisinin daha az emisyonla sebep olduğu aşikardır.

## 2.2 Yapı Malzemeleri için Alternatif-Uçucu Kül

### 2.2.1 Türkiye ve Dünyada Uçucu Kül

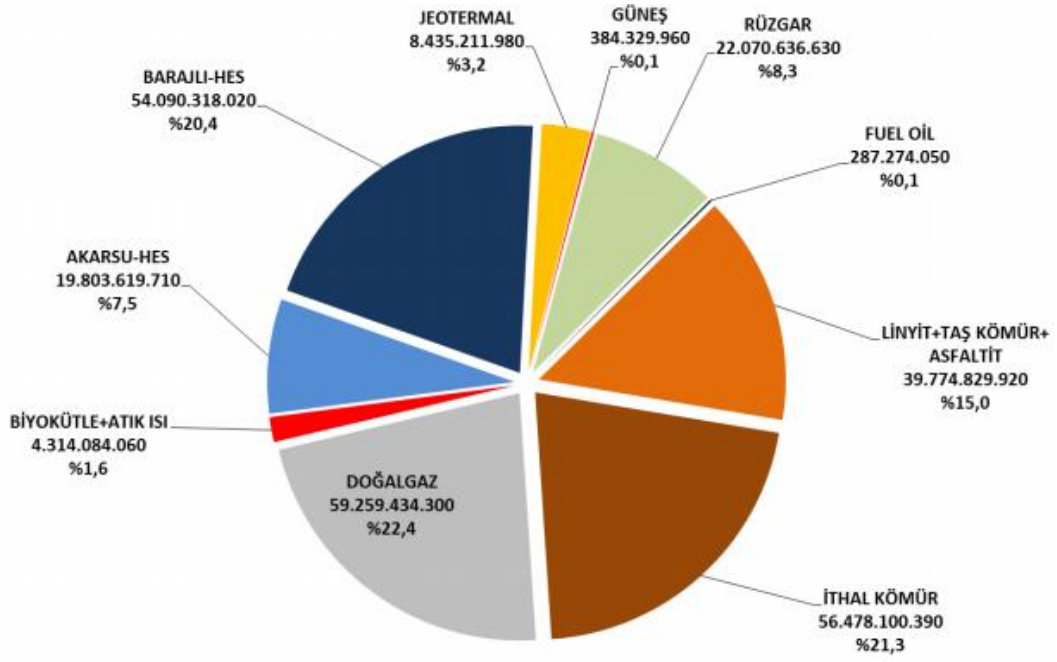
Nüfus artışı, kentsel gelişim ve sanayileşme ile birlikte dünyada enerji tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Dünya nüfusunun 2040 yılına geldiğimizde 1,6 milyarlık bir artış ile 9 milyar

seviyesine ulaşması beklenmektedir. Bu durum, daha fazla insana enerji arzı sağlanması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Enerji talebi her ülkede farklı oranlarda olsa da küresel ölçekte bakıldığında sürekli artış göstermektedir. 2016 yılı itibariyle dünya birincil enerji kaynaklarının %81'ini fosil yakıtlar oluşturmaktadır. 2040 yılında bu rakamın %79 seviyelerinde olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 2.2) (İnt. Kyn. 2).



Şekil 2.2 Yakıt türüne göre birincil enerji tüketimi.

2020 Kasım ayı verilerine göre Türkiye’de elektrik üretiminin yaklaşık %36’sı kömürlü termik santrallerden karşılanmaktadır (Şekil 2.3) (İnt Kyn 2). Bu oran Almanya’da %50, ABD’de %60 ve Güney Afrika’da %95’tir. 2020 yılında ise dünyada ortalama elektrik enerjisinin %50’sinin kömürden sağlanacağı tahmin edilmektedir (Anonim 2016).



Şekil 2.3 Türkiye’de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı.

Türkiye’de toplamda 13 adet büyük ölçekli termik santral bulunmaktadır. Termik santrallere, kullanılan kömürün cinsine ve miktarına ait bilgiler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Termik santrallerde kömürün yakılması sonucu iki çeşit kül çıkmaktadır. Bunlar, baca gazlarıyla sürüklenen uçucu kül ve baca gazlarıyla yükselemeyerek tabana çöken taban külleridir. Ülkemizde kömürle çalışan 13 adet termik santralden her yıl yaklaşık 20 milyon ton kül ortaya çıkmaktadır. Oluşan küller yaklaşık %75-80 uçucu kül, %20-25 taban külü içermektedir. 2019 verilerine göre ise tüm dünyadaki termik santraller incelendiğinde her yıl 500 milyon tonun üzerinde uçucu kül oluştuğu belirtilmiştir (İnt. Kyn.3).

**Çizelge 2.1** Türkiye’de bulunan termik santraller (Kaplan ve Gültekin 2010, İnt. Kyn. 4).

<b>Termik Santral Adı</b>	<b>Kömür Cinsi</b>	<b>Uçucu Kül Sınıfı</b>	<b>Kullanılan Kömür Miktarı Ton/Yıl</b>	<b>Oluşan Kül Miktarı (Ton/Yıl)</b>
Soma	Linyit	C	5.884.156	2.373.439
Çatalağzı	Taşkömürü	F	1.710.000	803.703
Kangal	Linyit	C	6.452.745	1.322.832
Sugözü	İthal Kömür	C	3.300.000	375.000
Tunçbilek	Linyit	C	1.240.786	591.854
Seyitömer	Linyit	F	5.850.000	1.989.000
Kemerköy	Linyit	C	3.962.987	1.585.195
Afşin-Elbistan	Linyit	C	23.382.791	6.141.137
Yatağan	Linyit	C	6.558.000	1.320.570
Orhaneli	Linyit	C	1.426.360	357.391
İçtaş	Linyit	C	431.200	64.680
Çan	Linyit	C	1.815.350	453.440
Yeniköy	Linyit	C	2.522.432	713.847

### 2.2.2 Uçucu Kül’ün Geri Kazanımının Önemi

Ülkemizde her yıl açığa çıkan milyonlarca ton küllerin; %48’i kül dağı-kül barajında, %21’i düzenli depolama sahalarında, %15’i lisanslı atık bertaraf firmalarına gönderilmekte ve %15’i bertaraf edilmektedir. Bugüne kadar 100 milyon tondan fazla uçucu kül, kül havzalarına ve düzenli depolama sahalarına bırakılmıştır. Uzun yıllar boyunca bölgede yığılan kül dağları yağın yağmurların etkisiyle puzolanik özelliklerinden dolayı betonlaşarak ortadan kalkması zor bir malzeme haline dönüşmektedir (Anonim 2016).

Uçucu külün yağmur suyuyla reaksiyona girmesi sonucu radon gazı denilen radyoaktif bir madde oluşmaktadır. Açık alanda depolanan küller, rüzgarın etkisiyle çevreye yayılmakta doğal çevrenin ve tarımsal alanların zarar görmesine sebep olmaktadır. Aynı zamanda açık alanda depolanan küllerin dioksin ve furan içerikleri yağın yağmur sularıyla yer altı sularına karışarak su kirliliğine sebep olmakta ve besin zincirine katılmaktadır. Küllerin içerisinde bulunan gazların bir kısmı havada kalarak asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Toplumsal açıdan ise astım, kanser, gelişim bozuklukları, üreme sorunları, cilt hastalıkları gibi bedensel

olarak birçok olumsuz etki yaratmaktadır (Kaplan ve Gültekin 2010). Bu sebepten uçucu küllerin geri kazanımları hem çevresel hem de toplumsal açıdan önem arz etmektedir.

2872 sayılı Çevre Kanunu, 12.05.2010 tarihli ve 27579 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Küllerin “Tehlikesiz Ve İnert Atıkların Geri Kazanımı Tebliği” kapsamında, küllerin çevreye olabilecek etkilerinin en aza indirilmesi, kül miktarının azaltılması, geçici depolanması, geri dönüşüm tesislerinin kurulması ve bu tesislerin çevreyle uyumlu yönetiminin sağlanmasına yönelik prensip, politika ve programların belirlenmesi için gerekli teknik esaslar düzenlenmiştir.

Ülkemizde termik santrallerden kaynaklanan küllerin çevreyle uyumlu bir şekilde yönetimi dört adımda gerçekleştirilebilir.

- Oluşan kül miktarının kaynağında azaltılması,
- Küllerin geri kazanımı (Döngüsel Ekonomi)
- Geri kazanılamayan küllerin mevzuata uygun depolanması
- Mevcut kül depolama sahalarının iyileştirilmesi (Anonim 2016).

Uçucu küllerin geri kazanımı konusunda kullanımına bakıldığında betonda mineral katkı malzemesi, çimento klinker hammaddesi, çimento ikamesi, katkılı çimento üretimi, karayolunda katkı-dolgu malzemesi, yapısal veya akışkan dolgular, tuğla-seramik üretimi, hafif agrega, refrakter sanayiinde, katı atıkların stabilizasyonu alanlarında kullanılabilmektedirler (Ahmaruzzaman 2010). Castor ve Pollux kuleleri (Frankfurt), Picasso Kulesi (Madrid), East Bridge (Kopenhag), Planaovryssi Barajı (Yunanistan), Olivenhain Barajı (Kaliforniya) uçucu küllerin geri kazanımında Dünya’daki örnek yapılarıdır. Lizbon’da Caixa Gérai Deposite bankasının binasında, Danimarka’da Great Bell East kapısının yapımında, Finlandiya’da Permantokoski hidroelektrik santralı yapımında, Fransa’da Puylaurent barajında, Hollanda’da Eindhoven Havaalanı uçuş pistinde, Avusturya’da yeraltı tren yolu tünellerinde, İtalya’da yer üstü elektrik direkleri yapımında, İskoçya’da Tornes Nükleer Enerji Santralı yapımında, İngiltere’de denize yapılmış, BP 'ye ait 570,000 varıl ham petrol depolama kapasitesine sahip yapıda, Belçika’da 4360 m yükseklikteki 4 adet uçucu kül depolama kulelerinin yapımında ve İngiltere ile Fransa’yı birbirine bağlayan ve 100 yıllık kullanım için dizayn edilen hızlı tren hattının tünel inşaatında uçucu kül kullanılmıştır (Güler vd. 2005).

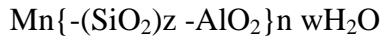
Türkiye’de uçucu kül kullanımı Avrupa ülkelerine oranla oldukça azdır. Danimarka, İtalya, Hollanda gibi ülkelerde atık depolanmasına izin verilmediğinden uçucu küller tamamen geri dönüştürülerek kullanılmaktadır. ABD ve İngiltere ortaya çıkan uçucu külün %50 sini, Almanya ise %97’sini geri dönüştürerek kullanmaktadır (Bhatt vd. 2019). Bu konuda birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen ülkemizde hala uçucu külün yüksek miktarda tüketimi sağlanamamaktadır. Uçucu küllerin tüketiminin artmasıyla birlikte hem depolama sorunu ortadan kalkacak hem de ortaya çıkan birçok çevresel ve toplumsal problemler çözülecektir. Bu tez kapsamında da uçucu küllerin ısı yalıtımlı yapı malzemesi olarak geri kazanımı konusu üzerinde durulmaktadır.

### 2.3 Geopolimer

Geopolimer terimi ilk kez Joseph Davidovits tarafından alüminosilikat minerallerinin düşük sıcaklıklarda, alkali ortamda polikondenzasyon reaksiyonu sonucunda üç boyutlu ağ yapılar oluşturması olarak tanımlanmıştır. Geopolimer malzemeler göstermiş oldukları mükemmel mekanik, fiziksel ve ısıl özellikler ile üzerlerine büyük ilgi toplamışlardır (Davidovits 2008). Geopolimer üretiminde hammadde olarak sentetik ve doğal alüminosilikat mineralleri ile uçucu kül, yüksek fırın cürufu, atık cam gibi endüstriyel atıklar da kullanılmaktadır (Juenger vd. 2011). Geopolimer kimyası genel olarak alüminosilikat minerallerinin kuvvetli alkali ortamda (alkali metal karbonat, alkali metal florür, alkali metal hidroksit, alkali metal alüminat ve alkali metal silikat) (Walther vd. 2015) çözünmesini izleyen geopolimer yapısını oluşturmak üzere partiküllerin yüzey aktif grupları ile çözülmüş gruplarının polimerizasyonunu içermektedir. Alkali ortam genellikle Na ve K esaslı hammaddeler (NaOH, KOH, sodyum silikat, potasyum silikat) yardımıyla hazırlanmaktadır. Fiyat performans açısından değerlendirildiğinde Na içerikli solüsyonlar, K içeriklilere göre daha sık tercih edilmektedir. Bunun sebebi olarak Na esaslı geopolimerlerin çözünme reaksiyonlarını teşvik etmesi sebebiyle, K esaslılara göre neredeyse iki kat yüksek mukavemet kazanmalarını sağlamaları ve oldukça ucuz olmaları söylenebilir (Taxiarchou vd. 2013).

Geopolimer kimyasal mekanizması ve tepkime entalpi değerleri tam olarak tanımlanamamakla birlikte, genel olarak silikatların ve alüminatların alkali bir ortamda çözünmesi ve bunu takiben geopolimer yapısı oluşturmak üzere çözülmüş grupların

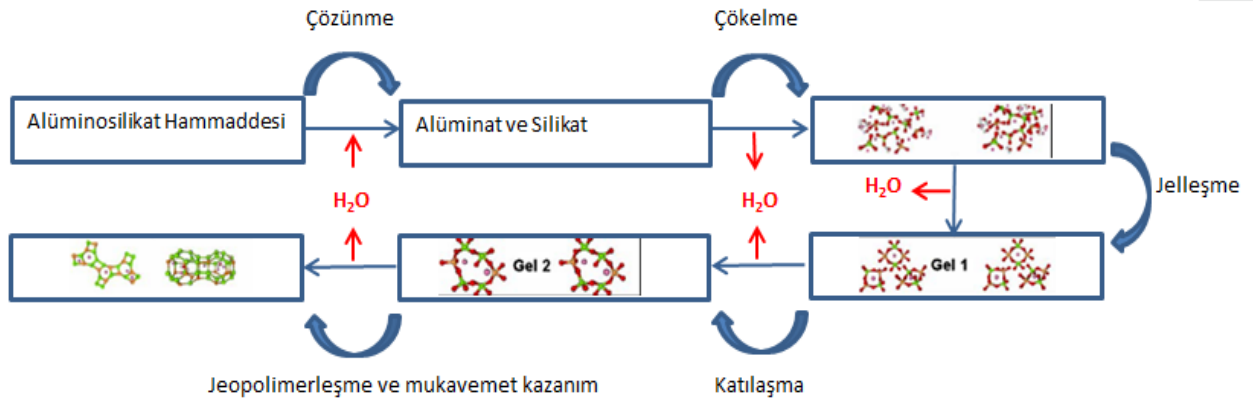
polimerizasyonu olarak açıklanmaktadır (Davidovits 2011, Mo vd. 2014). Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre sialat, polisialat silokso ya da polisialat di silokso oluşmaktadır. Geopolimer tepkimesindeki hammadde ve alkali çözelti içindeki sialat ve alüminatın Si/Al molar oranı oluşacak bağ yapısını, dolayısıyla malzeme özelliklerini etkilemektedir. Alkali ortamda çözünen Si-Al monomerleri aşağıda verildiği üzere Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu bir polimerik zincir ve halka yapısı oluşturmaktadır (Davidovits 2008):



M: kation (Na, K gibi),

n: polikondenzasyon sayısı,

z: üç boyutlu polikondenzasyon ağ yapı tekrar sayısıdır. (1,2,3, ya da en fazla 32 olabilir)



Şekil 2.4 Geopolimerleşme için kabul edilen kavramsal model (Yao vd. 2009).

Şekil 2.4'de verildiği üzere geopolimerleşmenin üç ana basamak üzerinde gerçekleştiği yorumlanmaktadır (Davidovits 2008).

- Si ve Al atomlarının hidroksit iyonlarının etkisiyle kaynak malzemedен çözünmesi.
- Öncü iyonların monomerlere taşınması, yönlendirilmesi veya yoğunlaştırılması.
- Monomerlerin polimerik yapılara ayarlanması veya polikondenzasyon/ polimerizasyon.

Geopolimerleşme reaksiyonu temel olarak üç basamakta verilmesine karşın, bu üç basamak neredeyse aynı anda gerçekleşebilmesi sebebiyle birbirlerini kamufle etmekte ve her birinin ayrı ayrı incelenmesini zorlaştırmaktadır (Palomo vd. 1999). Ekzotermik olarak gerçekleşen

geopolimerizasyon reaksiyonunda oligomer makro moleküler yapı oluşmakta ve her basamakta hidroksil iyonları oluşarak reaksiyon sırasında su açığa çıkmaktadır. Böylece polimerik Si-O-Al bağları oluşmaktadır (Zeybek 2009).

Joseph Davidovits'in tanımlamış olduğu, kullanılan alüminosilikat kaynağına göre geopolimer tepkimesine giren ve oluşan molekül grupları şu şekildedir (Davidovits 2008):

- Si-O-Si-O-silokso, poli(silokso)(su camı alkali-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- Si-O-Al-O- sialat, poli(sialat)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialat-silokso, poli(sialat-silokso)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialat-disilokso, poli(sialat-disilokso)
- P-O-P-O- fosfat, poli(fosfat)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- fosfo-sialat, poli(fosfo-sialat)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-silokso, poli-silikon

Davidovits aynı zamanda Si/Al oranına göre değişen molekül yapıları sayesinde üretilecek olan ürünlerin kullanım alanlarını da Çizelge 2.2'de verdiği üzere sınıflandırmıştır (Davidovits 2008).

**Çizelge 2.2** Geopolimer malzemelerin Si/Al oranına göre kullanım alanları.

Si/Al	Uygulama Alanı
1	Tuğla, Seramik, Yangından koruma
2	Düşük CO <sub>2</sub> çimentoları, beton, radyoaktif ve toksik atık kapsülleme
3	Isıya dayanıklı kompozitler, dökümhane ekipmanları, cam elyaf kompozitler
>3	Endüstri için sızdırmazlık malzemeleri
<b>35&gt;Si/Al&gt;20</b>	Yangına dayanıklı ve ısıya dayanıklı elyaf kompozitler

Davidovits'in alüminosilikat kaynağı olarak kullanmış olduğu kalsine kaolen ile yapmış olduğu denemelerde geopolimer oluşturabilmek için molar oksit oranlarını  $0.2 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0.48$ ;  $3.3 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4.5$  and  $10 < \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 25$  aralıkları için tanımlamıştır (Davidovits 1982). Barbosa vd. daha önceden tanımlanan geopolimer üretimi için molar



kompozisyon aralıklarında çalışmalar yapmış, optimal değerlerin  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  için 0.25,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  için 10 ve  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  için 3.3 olduğunu (Barbosa vd. 2000) belirtmişlerdir.

Teorik olarak, yüksek silika ve alümina içeriğine sahip olan herhangi bir malzemenin alkali ile etkinleştirilebileceği bilinmektedir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda yüksek fırın cürufu, metakaolen, uçucu kül, kaolinitik killer ve kırmızı çamurun geopolimerleşme kabiliyetinin olduğu konusunda sonuçlar elde edilmiştir. Kimyasal içeriklerindeki farklılık sebebiyle cüruf ( $\text{Si} + \text{Ca}$ ), metakaolen ( $\text{Si} + \text{Al}$ ) ve uçucu külün ( $\text{Si} + \text{Al}$ ) genel özellikleri, hidrasyon ürünleri, reaksiyon mekanizmalarının farklılıklar olduğu ortaya konulmuştur (Li vd. 2010). Geopolimerlerin bağlanma özelliğinin, üç boyutlu bir zeolit benzeri polimer oluşumunun bir sonucu olduğu varsayılmakla birlikte, yüksek fırın cürufu geopolimerlerde bu fazın CSH fazı olduğu kabul edilmiştir (Pacheco-Torgal vd. 2008). Wang ve Scrivener, alkali ile etkinleştirilen yüksek fırın cürufunun hidrasyon ürünlerinin; cürufun bileşimi, aktivatör tipi ve pH ortamından bağımsız olarak, ana hidrasyon ürününün düşük  $\text{Ca}/\text{Si}$  oranına sahip ve değişen derecelerde kristalliğe sahip kalsiyum silikat hidrat (CSH) olduğunu doğrulamışlardır (Wang ve Scrivener 1995). Puertas vd. ise NaOH ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu içeren geopolimeri XRD analizi ile incelemiş ve hidrotalsit ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) ve CSH fazının varlığını bildirdirmişlerdir (Puertas vd. 2004). Garnazio vd. NaOH ile aktifleştirilen metakaolen geopolimerlerinin reaksiyon ürünü olarak iyi mekanik özelliklere sahip N-A-S-H jelinin oluştuğunu bildirmişlerdir. Yaptıkları FTIR ve  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$  MAS-NMR çalışmalarından, üç boyutlu yapısının, paylaşılan O atomları ile bağlanmış alternatif  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$  tetrahedradan oluşan bir ağ [ $\text{Q}^4(\text{Al})$ ] olduğu sonucuna varılmışlardır (Granizo vd. 2002). Metakaolenli geopolimerin reaksiyon ürünü için genel formül  $2\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  şeklindedir. Aktivatör bir NaOH ve su camı karışımı olduğunda, oluşan malzeme amorf ve çimentoludur, ancak yapısı ve bileşimi NaOH tek başına kullanıldığında oluşan üründen farklıdır. Buna ek olarak, amorf N-A-S-H jeli, doğal zeolitik malzemelerle benzer kimyasal bileşime sahip olmasına rağmen geniş kristalli zeolitik yapıya sahip olmadığı analiz edilmiştir (Barbosa vd. 2000, Davidovits vd. 2008).

Geniş kullanım alanına sahip olan geopolimer teknolojisi, yangına dayanıklı malzemelerin üretilmesi, ısı yalıtkanlık, yapı malzemeleri, çimento-beton ve arıtma uygulamalarında da kullanılabilir. Buna ek olarak geopolimer teknolojisi, çimento endüstrisinde

kullanımına yer bulunamayan endüstriyel atıkların değerlendirilmesine büyük ölçüde olanak sağlamaktadır. Bu sayede geopolimerlerin kullanıldığı mühendislik uygulamalarında çimento üretimine kıyasla 80% daha az CO<sub>2</sub> salınımına sebep olduğu ve portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilen geopolimerlerin çevre ile dost üretim şekillerinin olduğu vurgulanmaktadır (Davidovits 2015). CO<sub>2</sub> değerlerinin atmosferde güvenli değeri çoktan geçmiş olması sebebiyle bilim adamları endüstriyi CO<sub>2</sub> salınımını azaltması ile ilgili çalışmalar yapmaya zorlamaktadır (Deventer vd. 2012).

Geopolimerlerin hazırlanmasında kullanılan tipik başlangıç hammaddeleri olarak endüstriyel atıklar, kalsine killer, ergitilmiş alüminosilikatlar, doğal hammaddeler ve bu malzemelerin çeşitli oranlarda karışımları bulunmaktadır (Davidovits 2011). Bahsedilen tüm mineraller Si, Al, O ile birlikte yapılarında H, Na, K, Ca ve Mg bulundurmaktadırlar. Tüm bu hammaddeler alüminosilikat hammaddeleri olarak adlandırılmaktadırlar (Davidovits 1988). Bu malzemelerle, hassas uygulamalar için zorlu gereklilikleri karşılayabilen geopolimerleri hazırlamak için geleneksel yaklaşımı kullanmak çok zordur. Buna ek olarak; metakaolenden çok, uçucu küllerde bulunan safsızlıkların geopolimerizasyon reaksiyonu ile aynı anda gerçekleştirdikleri reaksiyonlar geopolimer oluşum kimyasının ortaya çıkarılması açısından engel teşkil etmektedir (Brew ve MacKenzie 2007). Belirli bir alanda kullanılacak, istenilen özelliklere sahip geopolimer üretimi yapılabilmesi; kullanılacak olan hammaddelerin kimyasal kompozisyonlarına, hammaddelerin kalsinasyon sıcaklıklarına, alkali ortamın molaritesine, numunenin kurlenme süresi ve sıcaklığına göre değişkenlik gösteren molekül dizilimlerine bağlı olarak değişmektedir (Davidovits 2008).

### **2.3.1 Geopolimer Bileşenleri**

#### **2.3.1.1 Metakaolen**

Geopolimer üretiminde kullanılabilen kil mineralleri (sulu alüminosilikatlar) alkali aktivasyon prosesinde reaktif olabilmek için kalsinasyona ihtiyaç duymaktadırlar. Seramik malzeme üretiminde de uygulandığı gibi hammaddeye uygulanan kalsinasyon işlemi; boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamakta ve kompozisyon içerisindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta, böylece üretilecek ürünün reolojik özelliklerini iyileştirmektedir (Zeybek 2009). Kaolenin (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) dehidroksilasyonu sonucu elde edilen metakaolen (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>),

geopolimer alanında en çok kullanılan alüminosilikat kaynağıdır. Metakaolenin plaka şeklindeki partikül şekilleri su ihtiyacını arttırmakla birlikte gözenekli bir yapının oluşmasına sebep olmaktadır (Provis 2008). Alüminosilikat hammaddelerinin yeterince aktif olmasını sağlamak amacıyla yapılan kalsinasyon işlemi, sıcaklığa bağlı olarak reaksiyon hızını etkilemektedir. Yükselen kalsinasyon sıcaklığı kristalizasyonu da arttırdığından ötürü reaktiviteyi azaltarak geopolimerleşmeye olumsuz etkide bulunmaktadır (Peng vd. 2017). Metakaolenin reaktivitesi 500-800°C arasında uygulanan kalsinasyon sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Yapılan birçok çalışmada, metakaolenin iyi reaktivite göstermesi için uygulanması gereken kalsinasyon işleminin 700-800°C arasında olması gerektiği belirtilmiştir (Elimbi vd. 2011). Görhan ise 600, 700, 800, 900, 1000°C’de kalsine ederek elde ettiği metakaolen geopolimerlerin mukavemet değerlerini incelediğinde, sıcaklığın dayanım üzerindeki etkisinin net olmadığını bildirmekle birlikte, artan sıcaklığın daha düzenli yapıda metakaolen oluşumunu sağlaması sebebiyle dayanım değerlerinin düştüğünü bildirmiştir (Görhan 2020). Kalsinasyon sıcaklığına ek olarak, kaolenin tane boyutu, çeşidi, içerdiği kirlilik miktarı da reaktiviteyi etkilemektedir (Zhang vd. 2016). Metakaolen; uçucu küle ve yüksek fırın cürufuna göre daha tutarlı kimyasal kompozisyona sahip olmasına rağmen, inşaat sektöründe popüler olarak kullanılan bağlayıcılar arasında yer alamamıştır. Bunun sebebi olarak ise ısıtma işlemi ihtiyacı duyduğundan dolayı endüstriyel yan ürünlerden pahalı olması, plakamsı şekle sahip olması, yüksek yüzey alanına sahip olması, yüksek elektrostatik yük yoğunluğuna sahip olmasıdır (Kuenzel vd. 2012). Kaolenin metakaolene dönüşmesi için uygulanan kalsinasyon işlemi üretim aşamasına bir basamak daha eklediğinden ve azaltılmaya çalışılan karbon ayak izinin artışına sebep olduğundan dolayı kullanımı pek tercih edilmemektedir. Bu sebeple atık hammadde olarak bilinen uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bir kez daha ön plana çıkmaktadır (Luukkonen vd. 2018). Montmorillonit kil mineralinden oluşan bentonit de geopolimer hammaddesi olarak potansiyel bir hammaddedir. Fakat göstermiş olduğu düşük reaktivite sebebiyle, 550-850°C ısıtma işlemi ihtiyacı duyulmaktadır (Buchwald vd. 2009). Van Deventer vd. diğer doğal mineraller olarak potasyum feldspar, profillit, zeolit ve 1000°C’de NaOH ile kalsine edilmiş albitlerin geopolimer oluşturucu olarak kullanılabileceklerini bildirmişleridir. Aynı zamanda alkali aktifleştirilmiş olarak üretilebilecek doğal hammaddeler olarak şist, kil, feldspar, plagioklas, feldspatik hammaddeler, zeolit piroksen, ampibol ve endüstriyel hammaddeler olarak da uçucu kül, cüruf, kırmızı çamur, atık cam ve cevher madenciliği atıklarının kullanılabileceğini de belirtmişlerdir (Deventer 2008).

### 2.3.1.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan silis, kalsiyum alümin silis ve bazik kökenli bileşikler içeren ve erimiş halde elde edilen bir yan üründür. Demir cevherine safsızlıkları gidermek için cüruf ajanları (demir cevheri, kok külü ve kireçtaşı) eklendiğinde oluşmaktadır. Demir cevherini demire indirgeme sürecinde, erimiş demirin üzerinde yüzen metalik olmayan bir sıvı (esas olarak kalsiyum ve diğer bazların silikat ve alüminosilikatlarından oluşan) erimiş bir cüruf oluşur. Erimiş cürufun sıvı metalden ayrılıp soğutulması ile, soğutulma şekline bağlı olarak (genleştirilmiş, hava soğutmalı ve granüle) üç tip cüruf elde edilir (Li vd. 2010). Bu cürufların boşaltılması ve birikmesi büyük miktarda insan gücü, malzeme ve mali kaynak tüketmesinin yanı sıra çevreyi de kirletmektedir. Yüksek fırın cürufunun çoğu Portland çimento endüstrisinde veya beton üretim şirketlerinde kullanılmaktadır (Huang vd. 2015). Son yıllarda, çok miktarda silikon-alüminyum bileşeni içermesi nedeniyle, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, geopolimer malzemelerin hazırlanması çalışmalarında odak nokta haline gelmiştir (Liu 2007).

### 2.3.1.3 Uçucu Kül

Kömürün içerisindeki karbon moleküllerinin yanması sonucunda açığa çıkan yüksek ısı enerjisini, buhar tribünleri vasıtasıyla, elektrik enerjisine dönüştüren termik santraller, gelişmekte olan ülkeler için enerji ihtiyacının karşılanması konusunda önemli yere sahip olmakla birlikte, insan sağlığını ve doğayı tehdit eden sorunların oluşmasına da ortaya çıkan atıklardan dolayı sebep olmaktadır. Toz halindeki kömür-kil-şist karışımının yaklaşık 1200°C'de tribünleri döndürücü enerji elde edilirken, termik santral bacalarından kömür madeni içerisinde yer alan silika, alümina, demir oksit gibi diğer hafif ve ağır mineraller de yanmış karbon ürünleri (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> gazları) ile birlikte kısmi soğuma sonrasında basınçlı baca gazı ile atmosfere karışmaktadır. Kömür içerisindeki daha ağır bileşenler taban külünü oluşturacak şekilde çökerlerken; uçucu kül, mikron boyutundaki (1-200 µm) taneciklerin termik santral bacalarında bulunan elektrostatik çökeltici filtreler yardımıyla tutulmakta ve istiflenmektedir (İnt. Kyn. 4).

ASTM C 618 ve TS EN 197-1 uçucu kül standardına göre F ve C sınıfı olmak üzere iki sınıf uçucu kül bulunmaktadır. Uçucu kül karışımındaki CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranları külün sınıfını belirlemektedir. Bu karışım oranları da termik santralde kullanılmakta olan kömürün morfolojik yapısına bağlıdır. Antrasit, bitümlü kömür ve linyit yeraltından çıkarılan üç farklı kömür tipidir. Her birinin yanma öncesi molekül yapısı farklıdır. Dolayısı ile elde edilen uçucu küller çıktığı yerdeki jeolojik yapıya göre ve kömür tipine göre farklı özellikler göstermektedir. Uçucu külün üretimi ve karakteristikleri yakılan kömürün cinsi dışında; santral tipi, işletim biçimi, yanma biçimi, kömür kompozisyonu ve yakma sistemine göre değişiklik göstermekle birlikte aynı santraldeki farklı yüklemelerde bile değişiklikler göstermektedir (Gikunoo 2004).

ASTM C618'e göre içeriği SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >70% ve CaO<10% olan uçucu küller F tipi ve 50%>SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>70% ve CaO>10% olan uçucu küller C tipi olarak isimlendirilmektedirler. F tipi uçucu küller puzolanik özelliklere sahipken, C tipi uçucu küller içemiş oldukları yüksek CaO içerikleri sayesinde puzolanik özelliklerinin yanı sıra bağlayıcı özelliklere de sahip olduğu bilinmektedir (ASTM 2001).

Kömürün yakma koşulları ile birlikte kömürün oluşumu ile ilgili jeolojik faktörler de uçucu külün camsı içeriği ve kristal içeriğine etki etmektedir. Camsı silikat ve alümin oranları yüksek olan F tipi uçucu küllerde kuvars (SiO<sub>2</sub>), müllit (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>), hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve manyetit (Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) kristal fazlar olarak bulunmaktadır. C tipi küllerde ise serbest CaO'ye ek olarak anhidrit (CaSO<sub>4</sub>), feldspat plajiyoklaz, gehlenit türü kalsiyum silikat mineraller bulunmaktadır (Hüseyin 2016). CaO içeriği yüksek olan C tipi uçucu küller hızlı şekilde geopolimerin kürlenmesini sağladığından dolayı pek tercih edilmezler. Bunun yerine F tipi uçucu küllerinin tercihi söz konusudur (Görhan vd. 2008).

Uçucu küllerin kullanımı birçok alanda artmakla birlikte pahalı doğal kaynakların kullanımını azaltarak maliyetin de azalmasını sağlamaktadır (Fernández-Jiménez ve Palomo 2003). Uçucu küllerin döngüsel ekonomi kapsamında geri dönüştürülmesi hem çevreyi koruma, hem de atık yönetimi alanlarında önem arz etmektedir.

Genelde ön işleme tabi tutulmadan hazırlanan uçucu kül geopolimerleri Matalkah vd. tarafından bilyalı değirmende öğütülmüş ve mekanokimyasal aktivitesi artırılarak kullanılmış ve böylece mukavemet değeri ile nem dayanımının arttığı gözlemlenmiştir

(Mataalkah vd. 2017). Uçucu kül ile birlikte yüksek fırın cürufları da kullanılabilen, cüruflar uçucu külün aktivitesini arttırarak mukavemetinin artmasını sağlamaktadır (Peter Duxson ve Provis 2008). Aynı zamanda kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun tane boyutunun küçülmesi ile mukavemet değerlerinin arttığı görülmüştür (Görhan vd. 2008, Yang ve Song 2009). Uçucu küller düşük tane boyutları sayesinde yüksek fırın cüruflarına göre daha reaktifler. Buna ek olarak F tipi uçucu küller, yüksek kalsiyum içerikli uçucu küllere göre daha çok tercih edilirler. Bunun en önemli sebebi ise yüksek Ca varlığında, Ca'un geopolimerleşme esnasında yapıya girip mikroyapıyı değiştirmesidir (Rangan vd. 2005). Bu görüşün aksini Jaarsveld vd. yapmış oldukları çalışmaların neticesinde iddia etmişlerdir. Bu çalışmalara göre yüksek miktarda CaO içeren uçucu kül ile üretilen geopolimer yapılarda kalsiyum alüminat hidrat ve başka kalsiyum içeren bileşiklerin oluşması sebebiyle mukavemetin yüksek olacağı görüşünü savunmaktadırlar (Jaarsveld vd. 2003).

Fernández-Jiménez ve Palomo tarafından yapılan çalışma sonucunda geopolimer üretimi için en uygun özelliklere sahip uçucu kül ile ilgili çalışmalar yapılmış olup, yüksek bağlayıcı karaktere sahip uçucu külde olması gereken özellikle şu şekilde sıralanmıştır: ateş zaiyat %5'den küçük olmalıdır,  $Fe_2O_3$  miktarı %10'u aşmamalıdır, düşük CaO içeriğine sahip olmalıdır, reaktif silika miktarı 40-50% ve 80-90% arasında olmalıdır, tanecikler  $45\mu$  dan küçük olmalıdır (Fernández-Jiménez ve Palomo 2003).

Düşük kalsiyum içerikli alüminosilikat bazlı hammaddelerde geopolimerleşme üç ana basamakta gerçekleşmektedir :

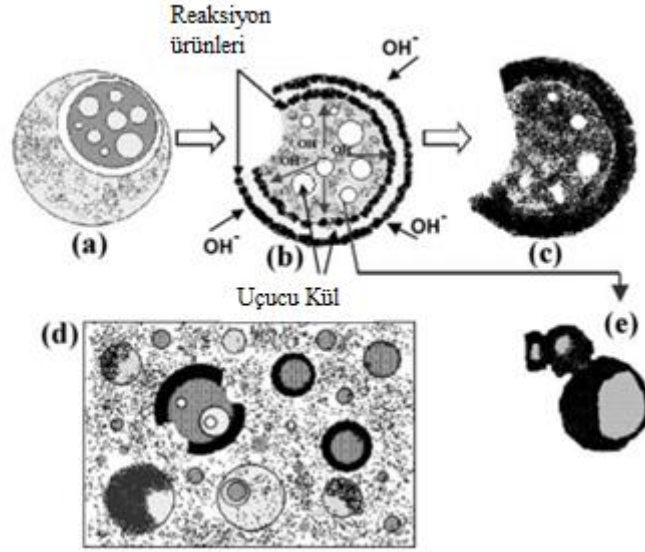
- 1) Alüminosilikat minerallerindeki Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının hidroksil iyonlarının karmaşık davranışları sonucu kırılarak, serbest  $SiO_4$  ve  $AlO_4$  tetrahedralarının oluşumu gerçekleşmektedir. Çözünme basamağı pH, tane boyutu, hammaddenin Si/Al içeriğinden etkilenmektedir. Yüksek pH ve düşük tane boyutu hızlı bir şekilde çözünme için tercih edilmektedir. Metakaolen ve uçucu külde Al'un Si'a göre daha hızlı serbestleştiği ileri sürülmüştür. Bu yüzden Si/Al oranının artmasının kinetik çözünmeyi olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Ahmaruzzaman 2010).
- 2) Polisilikatların yeniden yapılanması gerçekleşmektedir.  $SiO_4$  ve  $AlO_4$  tetrahedral birimlerinin amorf geopolimeri oluşturmak üzere birbirlerine dönüşümlü şekilde

bağlanarak jelleşmeleri gerçekleşmektedir. Çözünme ile jelleşme aynı anda gerçekleşmektedir. Oluşan jellerin partikül yüzeylerini kaplaması sebebiyle çözünme ve kütle transferi sekteye uğramaktadır. Bu durum, tamamlanmamış çözünmeye ve son üründe reaksiyona girmemiş fazların kalmasına sebep olmaktadır. Metakaolende çözünme devam ederken ve yeniden düzenlenme sırasında oluşan jel, Al içeriğince zengindir. Jelin oluşma süresi kullanılan hammaddeye, üretim koşullarına, aktivasyon için kullanılan çözeltilerin kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir (Ahmaruzzaman 2010).

- 3) Çökeltme ve polikondenzasyon basamakları; tüm sistemin inorganik, çapraz bağlı, üç boyutlu ağ yapıya dönüşümünü tanımlamaktadır. Mono alüminatların ve mono silikatların düzenlenmesi ile Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının oluşumu ile düzenli ağ yapı oluşmaktadır. Al-O-Al bağ yapısının oluşması ise tercih edilmemektedir. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için geçen zaman içeriğe, kürlenme koşullarına ve hammaddenin içerdiği kirliliğe bağlıdır (Ahmaruzzaman 2010).

#### **2.3.3.4 Uçucu Külün Geopolimerleşme Mekanizması**

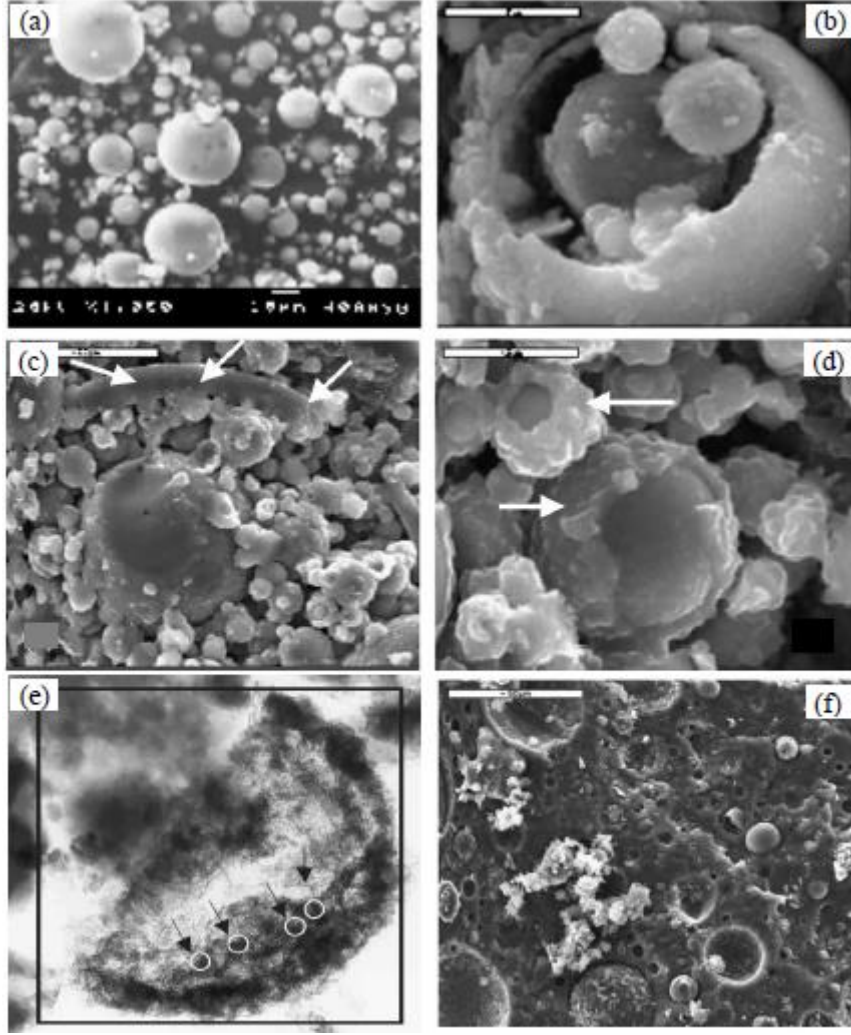
Fernández-Jiménez vd. tarafından yapılan çalışmada uçucu külün geopolimerleşmesi ile ilgili bir model oluşturulmuştur (Fernández-Jiménez vd. 2005). Bu modele göre ilk aşamada uçucu kül yüzeyi küçük bir alanda başlayıp daha sonra genişleyen bir alanda alkali çözelti ile kimyasal saldırıya uğrar (Şekil 2.5a). Yüzeyden başlayıp taneciğin alkali çözelti ile reaksiyona girmesi sonucunda hem yüzeyde hem de taneciğin iç kısımlarında reaksiyon ürünleri oluşmaya başlar (Şekil 2.5b). Uçucu kül tamamen ya da neredeyse tamamen reaksiyona girip tükenene kadar reaksiyon devam eder ve taneciğin hem içi hem de dışı reaksiyon ürünleri ile kaplanır (Şekil 2.5c). Reaksiyon hızı, uçucu kül boyutlarıyla ve karışım pH'ının lokal olarak değişkenlik göstermesi sebebiyle bölge bölge değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple hiç reaksiyona girmemiş taneciklerin de bulunduğu heterojen bir yapı oluşması kaçınılmazdır (Şekil 2.5d). Aynı zamanda yoğun bir katman olarak tanecik yüzeyinde oluşan reaksiyon ürünleri de alkali çözeltilerin penetrasyonunu zorlaştırarak küçük taneciklerin çözelti ile temasını engelleyerek yine tamamen reaksiyon ürününe dönüşmeden kalan uçucu kül taneciklerinin karışımda bulunmalarına sebep olmaktadır (Fernández-Jiménez vd. 2005).



**Şekil 2.5** Uçucu külün geopolimerleşmesinin tanımlayıcı modeli .

Fernandez Jimenez vd. yukarıda anlatılan tanımlayıcı modeli sodyum hidroksit ile 85°C’de 5 saat, 20 saat, 7 gün ve 60 gün kürledikleri numuneler ile hazırlamıştır. Daha sonra bu numuneleri taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelemiştir. Şekil 2.6a’da uçucu kül hammaddesinin küresel taneciklerini gösteren görüntüsü sunulmuştur. Şekil 2.6b geopolimerin 5 saat kürlenmesinin geopolimerizasyon sürecinin ilk aşamaları olduğunu ve düşük-orta seviyede geopolimerleşmenin başladığını göstermektedir. Şekil 2.6c ve 2.6d geopolimerik reaksiyonun daha ileri bir aşamasındaki uçucu kül partiküllerini göstermektedir. Oluşan reaksiyon ürünlerinin uçucu kül taneciklerinin etrafında birikmeye başladığını göstermektedir. Şekil 2.6e, 7 gün boyunca kürlenen numunenin görüntüsünü sunmaktadır. Burada reaksiyon sırasında alüminosilikat jele gömülen 25-35Å boyutlarında uçucu kül tanecikleri tanımlanmıştır. Şekil 2.6f ise 85°C’de yoğun geopolimer matris ve matrise gömülen reaksiyona girmeyen uçucu kül parçacıklarının olduğu analiz edilmiştir (Fernández-Jiménez vd. 2005).



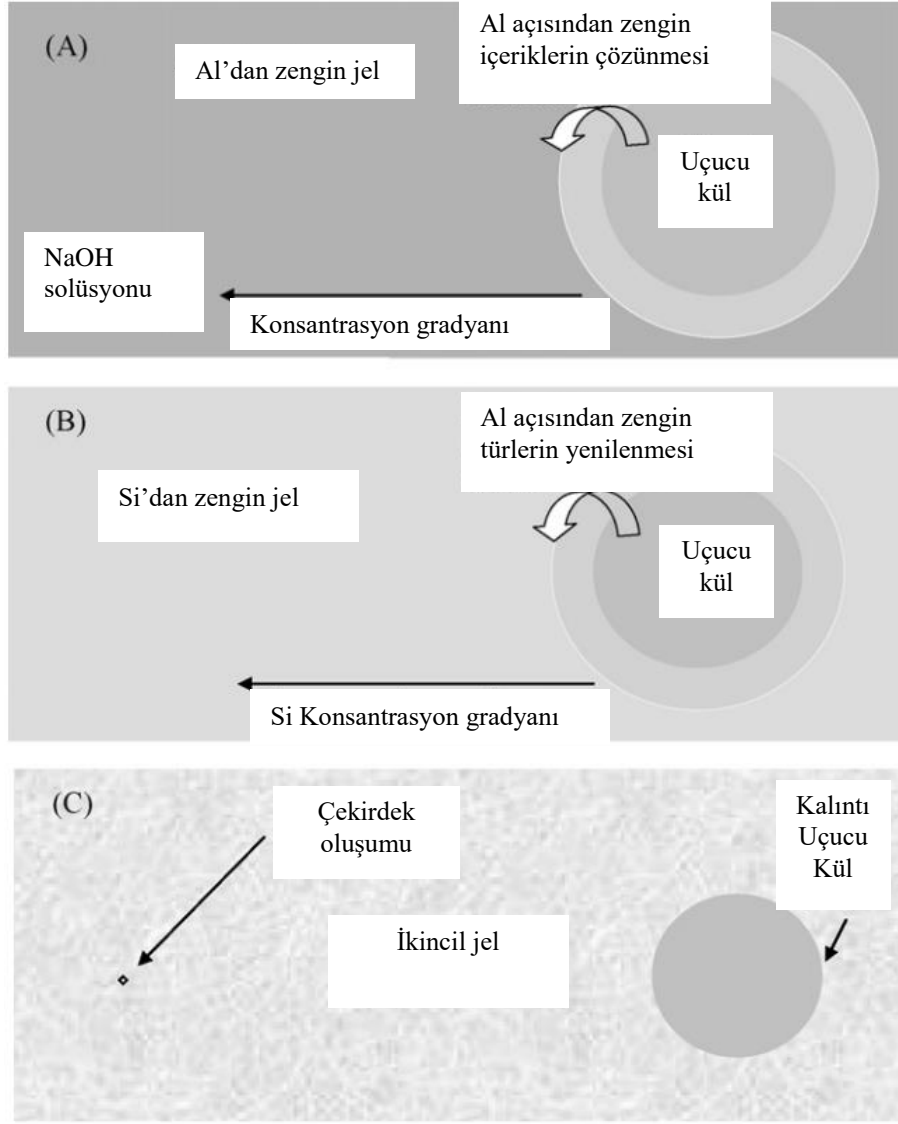


**Şekil 2.6** Geopolimerin mikrokimyasal gelişimi (Fernández-Jiménez vd. 2005).

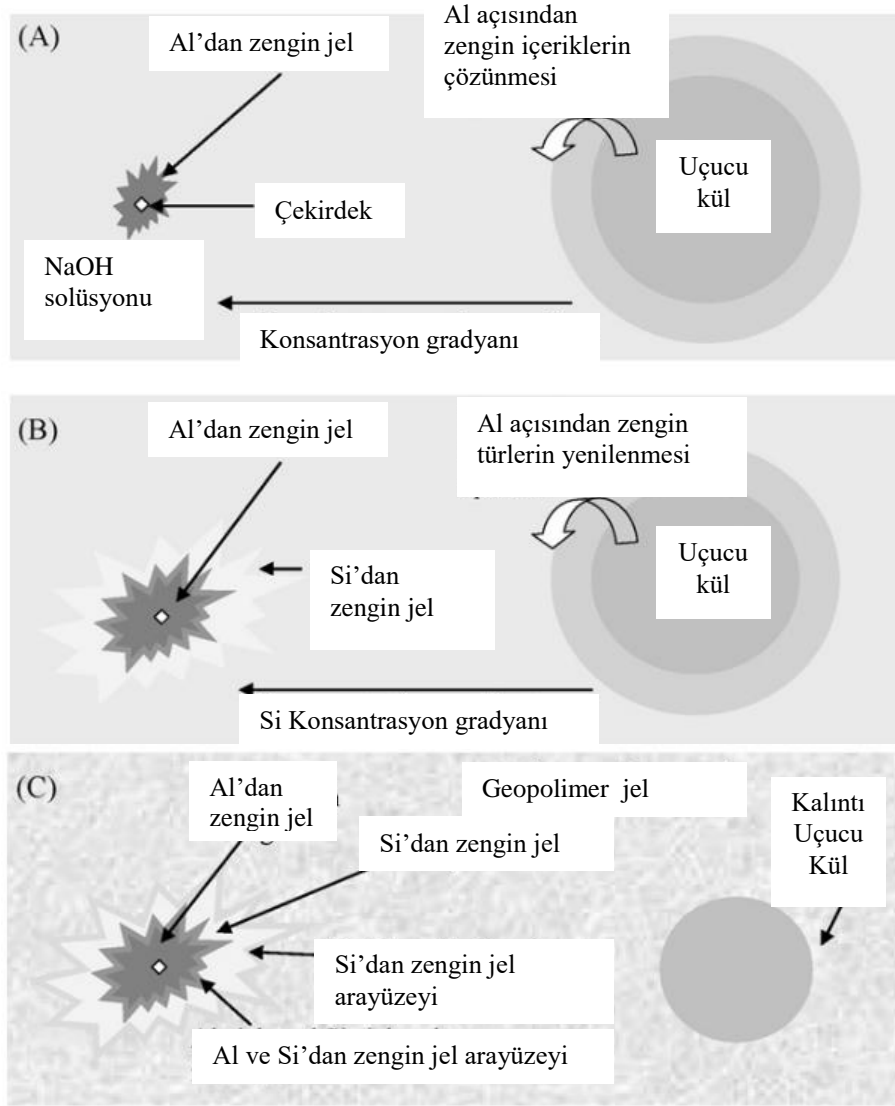
Rees vd. de yapmış oldukları çalışmada sodyum hidroksitle aktive edilen uçucu kül esaslı geopolimerin fizikokimyasal oluşum mekanizmasını bir diagram yardımıyla açıklamışlardır (Şekil 2.7). Bu mekanizmaya göre de başlangıçta uçucu kül hammadesinden Al bakımından zengin içeriklerin alkali karışıma salınarak uçucu kül yüzeyinde silisli bir tabaka oluşmaktadır. Al bakımından zengin içerikler, silisli tabakanın yüzeyine adsorbe olur ve hidroksil iyonlarının yaklaşmasını önleyerek yüzeyi pasifleştirir. Bu durum çözünme sürecini yavaşlatmaktadır. Zamanla silisli içerik sistemden çözünür, daha önceden çözünen Al içerikleri ile hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve geopolimer jeli oluşur (Rees vd. 2008). Yüksek silis içeriğine sahip geopolimer karışımlarında sonradan oluşan bu çözünme ile yüzeyde mürekkep şişesi gözenek şekli ile benzer şekilde kapiler boşlukların oluştuğu şeklinde yorumlar vardır. Silis içeriği düşük olan ya da çimento içerikli karışımlarda ise bu

tür boşlukların oluşmadığı, hatta var olan boşlukların zamanla reaksiyon ürünleri sayesinde kapandığı belirtilmektedir (Ma vd. 2013).

Rees vd. çekirdeklendirici katkı olarak aynı kompozisyon içeriğine farklı miktarlarda kullandıkları 200nm tanecik boyutuna ve 275 m<sup>2</sup>/g BET yüzey alanına sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile de geopolimerleşme reaksiyonunun gerçekleşme mekanizması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Başlangıçta (Şekil 2.8), uçucu külden bir Al salımı meydana gelir ve bu da çekirdek ile hemen tutulan jeli oluşturur ve ağ yapısı büyümesi başlar. Al bakımından zengin türlerin büyüyen çekirdeğe tutunması, uçucu kül çözünmesi için itici güç sağlar. Al'ın salınması uçucu kül üzerinde silisli bir tabaka oluşturur ve kısmen depolimerize haldedir. Bu katman, yüzeye yakınlığı ve kısmen depolimerize edilmiş yapısı nedeniyle kalan uçucu külden daha yüksek oranda çözünürdür. Bu katman çözüldükçe, çekirdeklerin yüzeyine eklenir, ancak engellenmiş jel difüzyonu iki fazın karışmasını sınırlar ve oldukça silisli bir jel ortaya çıkar. Bu faz ayrılmasını, çekirdeklendirilmiş geopolimer oluşumu sırasında gözlemlenen FTIR spektrumunun Si–O–Si bölgesinde oluşan (1100cm<sup>-1</sup>) yeni bantlarında kanıtlamışlardır. Uçucu külden silisli tabakanın çözülmesinden sonra alüminosilikatın stokiometrik salınımı başlar. Eş zamanlı olarak, çekirdeklenme bölgelerini çevreleyen yeni oluşan faz büyür ve çevreleyen solüsyon veya jelden çözünen silisli ve alüminli içerikleri tüketir. Bu şekilde, yığın jel, eşlenik oluşumunun başlangıcından sonraki aşamalarda olduğundan, son geopolimer jel bileşimi, tohumlanmamış geopolimerinkiyle aynı kalır (Rees vd. 2008).



**Şekil 2.7** Çekirdeklendirilmemiş geopolimer sentezinin şematik diyagramı. (A) Al'ın ilk erken salınımı ve Al açısından zengin birincil jel oluşumu. (B) Si açısından zengin tabakanın çözünmesi, jelin uyumlu çözünmenin başlamasından önce Si ile zenginleşmesi. (C) Si bakımından zengin jeli çevreleyen çözelti/katılar ile sözde dengeye gelir ve bir süre sonra çekirdeklenme meydana gelir (Rees vd. 2008).



**Şekil 2.8** Çekirdeklendirilmiş geopolimer sentezinin şematik diyagramı. (A)Al'ın ilk erken çözünümü;

Al bakımından zengin jel ile çekirdeklerin büyümesi. (B) Si bakımından zengin türler Al-tükenmiş katmandan çözülerek silisli bir jel oluşturması. (C) Faz ayrımı oluşumu (Rees vd. 2008).

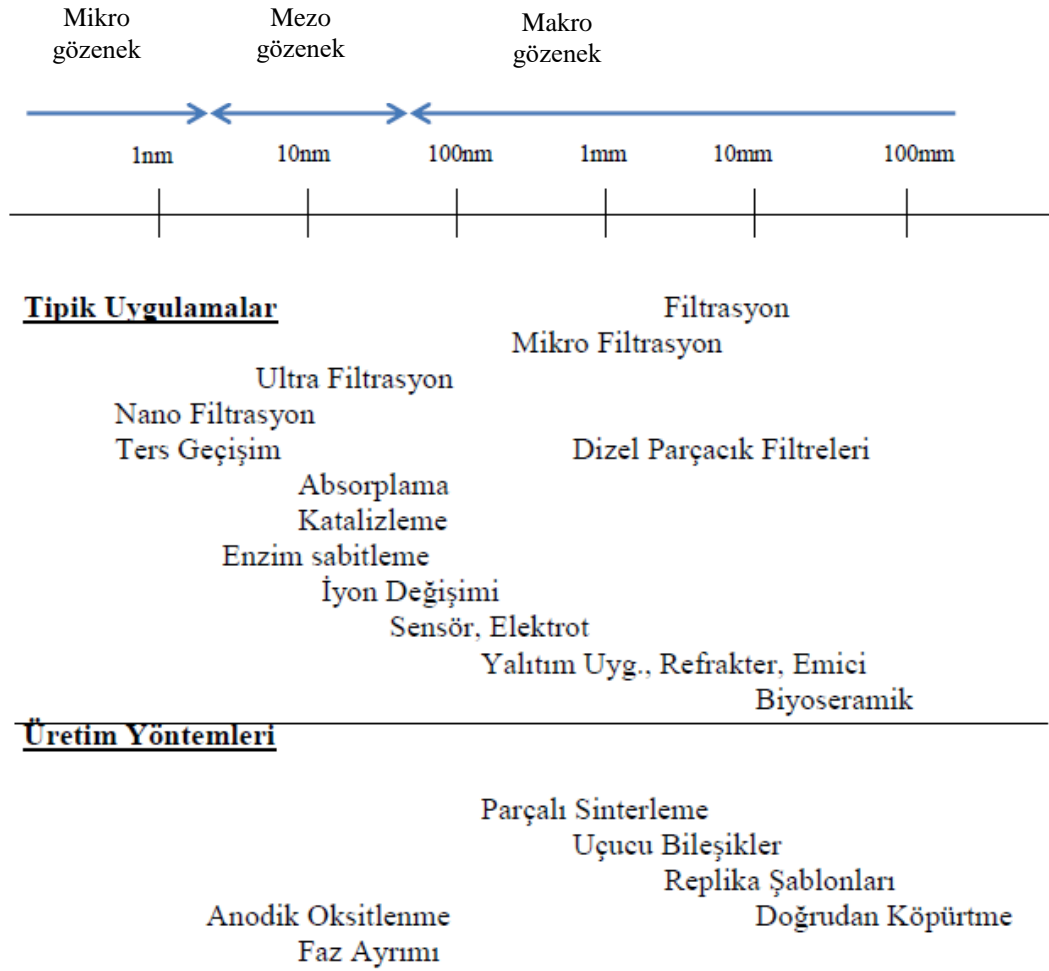
Bu bilgiler, geopolimerizasyon mekanizması hakkında ek bilgiler sağlamaktadır. Tohumuz bir sistemde, uçucu külden Al'ın seçici olarak çözünmesi, "birincil jel" olarak adlandırılan gevşek ve Al açısından zengin bir jel üretir. Uçucu kül yüzeyindeki Al eksikliği olan katman daha sonra çözülür ve ardından uçucu külden Al ve Si türlerinin stokiyometrik salınımı gerçekleşir. Bir indüksiyon periyodu sırasında jel, depolimerizasyon / yeniden polimerizasyon reaksiyonları yoluyla çevreleyen çözelti ile yavaş yavaş sözde dengeye gelir. Bu durum geopolimerizasyon reaksiyonunun gerçekleşmesinde 48 saatlik gecikmeye neden olabilir. Buna ek olarak nano boyutlu  $Al_2O_3$  tohumları geopolimere eklendiğinde nanopartiküller çekirdek oluşumunu anında katalize ettiğinden, herhangi bir indüksiyon periyodu meydana

gelmez. İlk aşamalarda, Al bakımından zengin türler çözelti içine salındığında, Al açısından zengin bir jel oluşur. Uçucu kül partikülleri üzerinde kalan silisli tabakanın çözünmesi, büyüyen çekirdeklere hızla eklenen ve yüksek silika içeren jel bölgesi oluşturan Si içeriğinden zengin türleri serbest bırakır. Eş zamanlı kül çözünmesi daha sonra tohumuz sistemine benzer şekilde büyüyen çekirdeklere eklenen Al ve Si içerikli türleri serbest bırakır ve tohumların yokluğunda gözlemlenen yapıya benzer bir bileşimde geopolimer jel oluşur (Rees vd. 2008).

### **2.3.2 Geopolimer Kullanım Alanları**

Gözenekli malzemeler genellikle filtreleme, soğurma, kataliz, hafif yapısal malzemeler ve yalıtım malzemeleri gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır (Landi vd. 2013, Medri vd. 2013, Ohji ve Fukushima 2012). Geçen yüzyılda araştırmacılar, yaratıcı yöntemlerle gözenekli seramik üretmek ve gözenek boyutunu, şeklini, konumunu, ara bağlantılarını ve özelliklerini kontrol etmek için birçok bilimsel çalışma yapmışlardır. Seramiklerin ısı ve korozyon dirençleri, aşınma dirençleri, yangına dayanıklılıkları, benzersiz elektronik özellikleri, yüksek biyouyumlulukları, düşük yoğunlukları, düşük ısıl iletkenlikleri, yüksek yüzey alanları, düşük dielektrik özellikleri ve gelişmiş piezoelektrik özellikleri nedeniyle kullanım alanları geniş bir yelpazeye yayılmıştır (Ohji ve Fukushima 2012).

Gözenekli seramikler, içerdikleri gözenek boyutlarına (d) göre üç şekilde sınıflandırılmaktadır. Makro gözenekli,  $d > 50\text{nm}$ , mezo gözeneklilikler  $50\text{nm} > d > 2\text{nm}$ , mikro gözeneklilikler  $d < 2\text{nm}$  olarak sınıflandırılmışlardır. Şekil 2.9, gözenek boyutuna göre üretim yöntemi ve uygulama alanları hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 2.9 Boyutlarına göre gözeneklerin sınıflandırılması, uygulama alanları ve üretim.

### 2.3.3 Geopolimerlerin Teknolojik Sınırlamaları

Yeni geliştirilen her teknolojinin, pazarda kabulü ve kullanıma alınması sırasında bazı sınırlamalar ile karşılaşmaktadır. Geopolimer malzemeler de, pazara girmek için birçok teknik ve endüstriyel engelin üstesinden gelebilmelidir. Geopolimerlerde karşılaşılan ve üstesinden gelinmesi gereken kuruma büzülmesi, çatlama ve çiçeklenme gibi sıklıkla karşılaşılan bazı problemler bulunmaktadır. Bu zorluklara ilişkin bilgiler aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

#### 2.3.3.1 Kuruma Büzülmesi

Birçok beton yapıda kaçınılmaz çatlama yol açabilecek kuruma büzülmesi, betonun kurutması sırasında kılcal gözeneklerdeki gerilimin artmasıyla numunede oluşan hacimsel değişim olarak tanımlanabilir (Eguchi ve Teranishi 2005). Betonun erken büzülmesi, genel olarak dayanıklılık tasarımında kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Kuruma

büzülmesi, küçük kılcal gözeneklerden hidrostatik gerilimle su kaybına bağlı olarak zamana bağlı bir deformasyondur ve sonunda ürünün içerisine agresif maddelerin girmesine izin veren çatlamalara neden olabilen ve dayanımının azalmasına neden olan ciddi bir problemdir (Bakharev vd. 1999).

Kurutma sırasındaki hacim değişikliğinin ardındaki mantığı anlamak için, kuruma sırasında meydana gelen olayları anlamak önemlidir. Scherer (Scherer 1988) tarafından yapılan bir çalışmada bir jelde kurutma aşamaları açıklanmıştır. Başlangıçta jelin doymuş olduğu ve bu nedenle gözeneklerde düz bir menisküs (buhar-sıvı temas açısı) olduğu düşünülmektedir. Bağlı nemde bir azalma olduğunda, kuruma gerçekleşmeye başlar ve katı madde havaya maruz kalmaya başlar. Scherer, çalışmasında katı/buhar ara yüzünün katı/sıvı ara yüzüne kıyasla daha yüksek bir enerjiye sahip olduğunu ve dolayısıyla suyun katı maddeyi kaplamak için hareket ettiğini bildirmektedir. Su katı maddeyi kaplamak için hareket ettikçe, gerilme gerilmeleri gelişir ve bu durum da jel üzerinde büzülmeye neden olan gerilmelere neden olur. Sıvının gerilme gerilimi altında olduğu katının gözenek duvarına bir basınç gerilmesi oluşturduğu bu durum, buharlaşmanın serbestçe meydana geldiği ve sabit oran periyodu olarak tanımlanır. Jeldeki nem içeriği azaldıkça, geliştirilen menisküsün yarıçapı azalır ve kurutma devam ettikçe, menisküsün yarıçapı minimum değerine ulaşana kadar azalmaya devam eder (Vijayakumar 2013). Bu durum büzülmenin incelenmesi ile ilgili bölümde detaylı şekilde açıklanmaktadır.

Erken sürede gerçekleşen büzülmelerin; ortamdaki nem miktarı, ürünün boyutları ve şekli, sıcaklık, su/bağlayıcı oranı gibi değişkenlere bağlı olduğu gözlenmiştir (Deb vd. 2015, Shi ve Day 1996). Yapılan çalışmalarda geopolimerlerin portland çimentosuna göre daha çok büzülme gösterdiği belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak ise geopolimer üretimi esnasında kullanılan suyun herhangi bir reaksiyona girmemesi, sadece sıvı bir ortam hazırlamak için karışıma ilave edilmiş olmasıdır (Hardjito vd. 2005, Djwantoro Hardjito ve Rangan 2005, Wallah 2009). Alkali aktivasyonla üretilen numunelerin büzülmesinin alkali aktivatörün çeşidi ve miktarı (Shi 1996, Shi ve Day 1996), kütleme koşulları (Li ve Sun 2000, Ridtirud vd. 2011), kullanılan agregalara kullanımları öncesinde uygulanan işlemler (Sakulich ve Bentz 2013), numune içerisindeki gözenek boyutu ve miktarı (Collins ve Sanjayan 2000) gibi durumlara bağlı olduğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır.

Köpük betonlar; düşük ağırlıklı olmaları ve yalıtım sağlamaları sebebiyle yapı sektöründe

çoğunlukla kullanılmaktadırlar. Fakat köpük beton normal ağırlıktaki betona göre çok daha fazla büzülme göstermektedir. Köpük betonun 1 yıl sonra ölçülen kuruma büzülmesi % 0.1 ile % 0.36 arasında değişmektedir; bu, yoğun harç ve beton numunelerin tipik büzülmesinden 5-10 kat daha yüksektir (Zhang vd. 2014). Aynı zamanda uçucu kül ile hazırlanan ya da yüksek fırın cürufu ile hazırlanan geopolimer numuneler farklı büzülme özellikleri göstermektedir. Bunun sebebi ise oluşan reaksiyon ürünlerinin farklı oluşudur (Lee vd. 2014). Li vd. hazırlamış oldukları derleme makalede geopolimerlerdeki kullanılan farklı hammaddelerin farklı bağlayıcı faz oluşturduğunu bildirmişlerdir. Yüksek fırın cürufunun (Si+Ca) sisteminde bulunduğunu ve oluşan reaksiyon ürününün CSH esaslı olduğunu, metakaolen ve uçucu kül gibi (Si+Al) sisteminden hazırlanan geopolimerlerde ise reaksiyon ürününün zeolit benzeri (N-A-S-H jeli) polimerler olduğundan bahsetmişlerdir (Li vd. 2010). Alüminasilikatların alkali aktivasyonu, hammaddenin çözünmesi, taşınması ve polikondenzasyonunu içeren karmaşık bir kimyasal reaksiyondur. Geopolimerizasyon, kesin reaksiyonları henüz tam olarak anlayamamış kimyasal bir süreçtir (Duxson vd. 2007). Kimyasal işlemdeki karmaşıklık nedeniyle, farklı kürlenme koşulları altında, farklı aktivatörler ve alüminasilikat hammaddelerinin kombinasyonlarının mekanik özellikler ve büzülme davranışı üzerinde farklı etkileri olabilmektedir (Mastali vd. 2018).

Alkali aktif bağlayıcılarda artmış alkali konsantrasyonun, kuruma büzülmesinin artışına sebep olduğu söylenmektedir (Brooks vd. 2000). Duxson vd. Si/Al oranı ve jel yapısının Na bazlı geopolimerdeki büzülme ve yoğunlaşma üzerinde doğrudan etkisi olan iki ana parametre olduğunu bildirmişlerdir (Duxson vd. 2007).

Uçucu kül ve cüruf gibi hammaddelerin geri dönüştürülerek kullanılmasını amaçlayan birçok çalışmada genel olarak bu tür malzemelerin mikro yapıları ve mekanik özellikleri üzerinde durulmuştur. Uçucu kül içeren geopolimer sistemlerinin pratik uygulamaları, uzun süreli dayanıklılık özelliğinin bilinmemesi ve büzülme ile mikro çatlamaya karşı yetersiz kalmaları nedeniyle hala düşük ihtimaldir (Hardjito vd. 2005). Buna ek olarak geopolimer malzemelerin büzülme özelliklerini inceleyen çok az sayıda çalışma yapıyor olması bu malzemelerin pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini ne yazık ki olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasının bir bölümünde geopolimer malzemelerin büzülme davranışlarının incelenmesi konusu üzerinde durulmuştur ve geopolimer köpük malzemelerin büzülme problemlerinin azaltılması veya çözülmesi hedeflenmiştir.



## **Si/Al Oranının Kuruma Büzülmesi Üzerine Olan Etkisi**

Si:Al oranı geopolimerleşmenin başlangıçtaki çözünme anlarında, geopolimer jellerin oluşumunda önemli bir faktördür. Çözünme esnasında Al salınımının Si'den daha hızlı olduğu öne sürülmektedir. Çözünmüş Al, ortamda bulunan alkali solüsyondan gelen herhangi bir silikat ile reaksiyona girerek alüminosilikat oligomerlerinin oluşumunu sağlamaktadır. Bu sebepten sodyum silikat çözeltisi ile hazırlanan geopolimerler sodyum hidroksit çözeltisi ile hazırlanan geopolimerlere göre daha iyi mekanik özellik göstermektedir (Duxson vd. 2007).

Hazırlanan karışım içerisinde bulunan Al miktarı alkali aktifleştirilmiş çimentolar için önem taşımakla birlikte, geopolimerin temel özelliklerini önemli ölçüde kontrol etmektedir (Duxson vd. 2007, Fernández-Jiménez vd. 2006). Karışımdaki mevcut Al miktarı ve reaksiyon boyunca salınım oranı sadece nihai mukavemeti değil, aynı zamanda ıslak ve sertleştirilmiş durumlardaki özelliklerini, eğilme mukavemetini, asit direnci, mikroyapı ve mukavemet de dahil olmak üzere diğer özelliklerini de etkilemektedir. Yüksek fırın cürufunda ve metakaolende sırasıyla yaklaşık % 10 ve % 40 alüminyum oksit bulunmaktadır. Hidrasyon ürünlerindeki farklılık sebebiyle Al'un bu iki sistemdeki rolü farklılaşmaktadır ( Li vd. 2010).

Si:Al oranlarının  $\leq 1.4$  olan metakaolen esaslı geopolimerlerin,  $^{27}\text{Al}$  MAS NMR ile, tüm çözünmüş Al'u jel yapısına dahil edemediğini analiz edilmiştir. Bununla birlikte, Si:Al oranları  $\geq 1.65$ 'te, yapıya dahil edilmemiş  $\text{AlO}_4^-$  gözlemlenmemiştir (Duxson vd. 2005). Mekanik özellikler açısından, metakaolen esaslı geopolimerlerin Si:Al oranının genellikle 2 civarında olması geopolimerleşme için ideal sayılmaktadır. Kuenzel vd. yapmış olduğu çalışmada Si:Al oranının 1.6–2.4 oranı arasında numuneler üzerinde çalışmışlardır. Si içeriğinin artması ile numunelerin kuruma büzülmesine daha dayanıksız olduğunu gözlemlenmişlerdir. Daha iyi şekilde açıklanacak olursa kuruma büzülmesini önlemek için gerekli olan kritik minimum su içeriği veya “yapısal” su miktarının, artan Si içeriği ile doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir (Kuenzel vd. 2012). Başka bir çalışmada ise, Si:Al oranının 1.15'ten 2.15'e çıkarılmasının  $^2\text{H}$  MAS NMR spektrumlarının kademeli olarak genişlemesine neden olduğu ve “yapısal” su içeriğinin artan Si:Al oranı ile değiştiğini göstermektedir (Duxson vd. 2005). Al içeriği arttıkça kompozisyondaki “yapısal” suyun arttığı bildirilmektedir. Al içeriğinin, yük dengeleme  $\text{Na}^+$  katyonlarının iyon aktivitesini etkilediği söylenmekle birlikte, daha yüksek Al içeriklerinde daha düşük aktiviteler beklenmektedir. Bu yorumdan yola çıkarak  $\text{Na}^+$  katyonlarının “yapısal” suyun önemli bir

parçası olabileceği yorumlanmaktadır (Kuenzel vd. 2012).

Kuenzel vd. geopolimer karışımlarının Si:Al oranının değiştirilerek karışım için gerekli olan minimum su miktarının değiştirilebileceği ve böylece kuruma büzülmesinin azaltılabileceğini ya da önlenebileceğini bildirmektedirler. Farklı Si:Al içeriğine sahip geopolimer numuneleri sırasıyla <math>150\text{ }^{\circ}\text{C}</math>, <math>150\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}</math> ve <math>300\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}</math> arasında ısı işleme tabi tutmuşlar ve kaybettikleri su miktarları “serbest su”, “geçiş suyu” ve “hidroksil su” olarak tanımlamışlardır. Farklı Si:Al içeriğine sahip numunelerin serbest su, geçiş suyu ve hidroksil su olarak kaybettikleri su miktarları arasında ciddi farklılıklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Ortam sıcaklığında kurutmaya bırakılan ve serbest su kaybeden numunelerde Si:Al oranı 1.8 olan numunede büzülme miktarının Si:Al oranı 2.2 olan numuneye göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Fakat >300 °C de hidroksil su kaybetmeye başlayan numunelerde durumun tam tersine dönüştüğünü kaydetmişlerdir (Kuenzel vd. 2012). Duxson vd. tarafından yapılan bir çalışmada, artan Si:Al oranıyla ısı büzülmenin, daha yüksek silika içerikli numuneler için daha iyi Young modül değerlerine atfedilebileceği, hidroksil su kaybı sırasında kılcal gerilmeye daha iyi direnç gösterebilecekleri şeklinde açıklanmıştır (Duxson vd. 2007).

### **Si/Na Oranının Kuruma Büzülmesi Üzerine Olan Etkisi**

Taze ve sertleşmiş uçucu kül esaslı geopolimerin özellikleri genel olarak uçucu kül içindeki alüminosilikat oksitlerin çözünme hızının doğrudan hidroksil iyonlarının yüzey konsantrasyonu ile ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Geopolimer sistemdeki alkali konsantrasyonunun artmasıyla, hidroksil iyonlarının konsantrasyonu artmakla birlikte, uçucu külün Si ve Si-Al fazlarının daha yüksek oranda çözünmesiyle geopolimerizasyon sürecini iyileştirmektedir (Gunasekara vd. 2014).

SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranındaki artış polimerizasyon derecesini arttırmakla birlikte çözeltideki düşük silikat konsantrasyonu alüminosilikat jelin hızlı oluşumunu teşvik etmektedir. Çözeltideki daha yüksek silika konsantrasyonu ise sistemdeki alkaliniteyi azaltmakla birlikte silika ağlarından ziyade silika zincirlerinin (Si-O-Si) oluşumuna neden olmaktadır (Zheng 2009). Düşük silika içeriği, kararsız bir jel oluştuğu için daha yüksek derecede yapısal yeniden düzenlemeye neden olur. Bu, sertleşmeden önce çok yoğunlaşmaya neden olur. Bu nedenle, düşük SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O içeren geopolimerlerde büzülme, suyun atılmasından dolayı daha düşüktür. Daha yüksek SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranında, alüminosilikat yerine oluşan bir Si-O-Si ve silika

tetrahedra ağı vardır ve başlangıçta daha az yoğunlaşma gerçekleşir. Yüksek  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranına sahip karışımlarda jelin sonraki aşamalarda yeniden organizasyonu daha sonraki bir aşamada gerçekleşmekte ve bu nedenle daha yüksek büzümeye neden olmaktadır (Vijayakumar 2013).

### **Na/Al Oranının Kuruma büzülmesi Üzerine Olan Etkisi**

Geopolimer üretim aşamasında hazırlanan Na içeren alkali ortamın asıl görevi alüminosilikat içerikli hammaddelerin çözünmesini kolaylaştırmaktır. Na iyonları, çimentolu jelde oluşan negatif yüklü tetrahedral  $\text{AlO}_4^-$  grupları üzerinde yük dengeleme katyonları olarak işlev görmektedir. Bu iyonların kimyasal olarak bağlı olmadığı düşünülmeyle birlikte, dışarı sızabilir (Aly vd. 2008) ve potansiyel olarak diğer iyonlarla yer değiştirebileceği düşünülmektedir (Kuenzel vd. 2012).

Na:Al oranının kuruma büzülmesi üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu Kuenzel vd. tarafından gözlemlenmiştir. Çalışmalarına Na:Al oranını 0.7-1.3 arasında değiştirmişler ve düşük oranlarda geopolimer karışımının daha düşük miktarda su ihtiyacı olduğunu ve bu şekilde hazırlanan numunelerin daha düşük kuruma büzülmesi gösterdiğini raporlamışlardır. Stokiyometrik ve deneysel olarak, Na:Al molar oranının 1 olmasının genellikle ideal olduğu düşünülmektedir. Sabit Si:Al oranını korumak için NaOH olarak ilave edildiğinde fazla Na iyonunun, ilk çözünme aşaması için önemli olan karışımın alkalinitesini artıracaktır. Bununla birlikte, Na:Al oranları > 1 olmasıyla, teorik olarak, sertleştirilmiş karışımlarda aşırı  $\text{Na}^+$  iyonlarının bulunmasının kimyasal açıdan çok fazla yararı bulunmamaktadır. Fazla  $\text{Na}^+$  iyonları, kuruma büzülmesine karşı direnç açısından açıkça olumsuz bir etkiye sahiptir (Kuenzel vd. 2012). Geopolimer çamurunun alkalinitesinin artması ile yapısal su miktarı artmakta ve kuruma büzülmesi miktarı da bu doğrultuda artmaktadır.

Geopolimer karışımının alkali içeriğinde  $\text{K}^+$  içeren kimyasallar kullanıldığında kuruma büzülmesinin Na içeren numunelere göre daha az olduğunu gözlemlenmiştir (Kuenzel vd. 2012).  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  iyonları arasındaki temel fark, daha büyük olan  $\text{K}^+$  iyonunun nispeten daha düşük bir yük yoğunluğuna sahip olması ve bu nedenle, sulu bir ortamda, iyonun çevresinde daha kolay çıkarılabilecek bir polar su molekülleri küresi oluşturmasıdır. Bu,  $\text{K}^+$  iyonları (~ 75kcal / mol) için  $\text{Na}^+$ 'dan (~ 95kcal / mol) daha düşük serbest hidrasyon enerjisine sahiptir (Migliore vd. 1988). Aynı zamanda bir  $\text{K}^+$  iyonunun iyonik yük yoğunluğunu belirli bir

seviyeye stabilize etmek için, eşdeğer bir Na<sup>+</sup> iyonundan daha az hidrasyon suyu gerektirir. Bu açıdan düşünüldüğünde Cs (sezyum) ile hazırlanan geopolimer karışımlarının kurutma büzülmesinin daha da düşük olması beklenmektedir (Kuenzel vd. 2012).

Atiş vd. (2009) cüruf esaslı ve sodyum hidroksit ile sodyum karbonat kullanarak hazırladıkları iki ayrı alkali ortam ile yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda sodyum hidroksit ile hazırlamış oldukları geopolimer karışımlarının daha çok kuruma büzülmesi gösterdiğini bildirmişlerdir. Buna ek olarak Collins vd. (2001) de yapmış oldukları çalışmalarda benzer sonuçları elde etmişlerdir.

### **Kürleme Koşullarının Kuruma büzülmesi Üzerine Olan Etkisi**

Sıcaklık, nem, rüzgar hızı gibi çevresel koşullar kuruma büzülmesini etkileyen önemli faktörlerdir. Özellikle düşük nemin olduğu, sıcak ve rüzgarlı koşullar kuruma büzülmesinin hızlanmasına ve yüksek miktarda kuruma büzülmesinin gerçekleşmesine neden olmaktadır (Ward vd. 2006).

Aydın vd. (2012) farklı SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranlarında ve otoklavlama, buharla sertleştirme ve ortam sıcaklığında kürleme gibi farklı kürleme rejimlerinde numunelerin kurutma büzülmeleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Standart koşullarda kürlenmiş numunelerdeki kurutma büzülmesinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca SiO<sub>2</sub> miktarı artan karışımlarda da kurutma büzülmesinin diğerlerine kıyasla daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Collins vd. tarafından ortam nemine göre numunelerin kuruma büzülmesi davranışları incelenmiştir. Kurutma sırasında %70 nem oranında bulunan numunelerin Portland çimentosu ile benzer büzülme değerleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Nem miktarının %50 ve %33 olduğu ortamlarda numunelerin Portland çimentosuna göre sırasıyla 2.3 ve 3.0 kat daha fazla büzüldüğünü gözlemlemişlerdir (Collins vd. 1999).

### **Su Miktarının Kuruma Büzülmesi Üzerine Olan Etkisi**

Kuenzel vd. yapmış oldukları deneysel çalışmada geopolimer karışımına eklenen toplam su miktarının kuruma büzülmesini önlemek için gereken kritik minimum su içeriğini önemli ölçüde değiştirmediğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada gözlemledikleri temel fark, daha yüksek başlangıç su içeriğine sahip numunelerde, kritik minimum su içeriğine

ulaşmadan önce daha fazla suyun çıkarılması gerektiğidir. DSC analizine göre geopolimer karışımlarındaki fazla suyun 20-100°C arasında bünyeden uzaklaşarak endotermik pik oluşturduğunu, yaklaşık 850°C’de ise sinterlemeden dolayı ekzotermik pik oluştuğunu analiz etmişlerdir. TGA analizinde de 150°C’ye kadar bünye içerisinde bulunan %35 suyun serbest su olarak bünyeden uzaklaştığını analiz etmişlerdir. Daha yüksek başlangıç karıştırma suyu içeren numunelerin, büzülme başlamadan önce daha fazla mutlak miktarda bünyeden su uzaklaştırdığını belirtmişlerdir (Kuenzel vd. 2012).

Bu açıklamalara göre geopolimer numunenin kuruma büzülmesi üzerinde numunenin gözenekliliği ya da geopolimer jelin yoğunluğundan çok, numunenin başlangıçta içerdiği toplam molar su miktarının daha etkili olduğu düşünülmektedir. Numunelerdeki büzülmenin yapısal suyun bünyeden uzaklaşması sonucu oluştuğu söylenmekle birlikte, Si:Al ve Na:Al molar oranları ile doğrudan bağlantılıdır. Kuruma büzülmesi meydana gelmeden önce kaybedilen suya “serbest su” denmektedir. Bu su kimyasal olarak bağlı olmadığından, mikro gözenek ağında herhangi bir kılcal basınç oluşturmadan basitçe açık makro gözenekli ağdan uzaklaşabilir. Ancak, serbest sudan daha fazlasının bünyeden uzaklaşması büzülme tetiklemektedir (Kuenzel vd. 2012).

### **Kuruma Büzülmesi ve Gözenek Boyutu İlişkisi**

Numuneden ilk aşamada kaybedilecek olan serbest su, geniş kapiler porlardan gerçekleşmektedir (>50nm). Bu su kaybı önemli miktarda hacimsel boyut değişimine neden olmamaktadır. Ancak kurutma devam ederken küçük kılcal gözeneklerden (<50nm) ve jel porlardan su kaybı devam etmektedir (Mehta ve Monteiro 1993). Kılcal gözenekler içerisindeki basınçtaki azalma sonucu kalıntı sudaki gerilme stresi artışı ile kapiler su içerisindeki gerilme stresi ve su çevresindeki numunenin mukavemetlerinin dengelenmesi numunede büzülme sebeptir. Jel porlardan gerçekleşen su kaybı, katının yüzey enerjisini değiştirerek daha fazla büzülme sebeptir. Fakat numunenin kurutmaya bırakıldığı ortamın nemli veya ıslak oluşu, numunede hacimsel olarak genleşme ya da şişlik meydana getirmektedir. Kuruma büzülmesinin sırasında numunede kısıtlamalar kurutma sırasında malzeme içerisinde çekme kuvvetlerini geliştirmekte ve çatlamlara yol açmaktadır. Mineral katkıları ile kılcal damarların gözenek yapısında oluşturulan değişiklikler, malzemenin büzülme davranışını da değiştirmektedir. Silis dumanı ilavesi ile karışımlarda gözeneklerin büzülmesi sonucu kuruma büzülmesinin arttığı yönünde çalışmalar mevcuttur

(Rao 2001).

Genel olarak gözenek boyutlarının küçültülmesi üzerine yapılan puzolanik veya ilave malzemeler içeren çimentolarda ve geopolimer çalışmalarında kuruma büzülmesinin artışına sebep olduğu belirtilmektedir. Böylece kılcal ağ ne kadar ince olursa, kılcal gerilmenin de o kadar yüksek olduğu söylenmektedir (Jennings 2008, Neto vd. 2010).

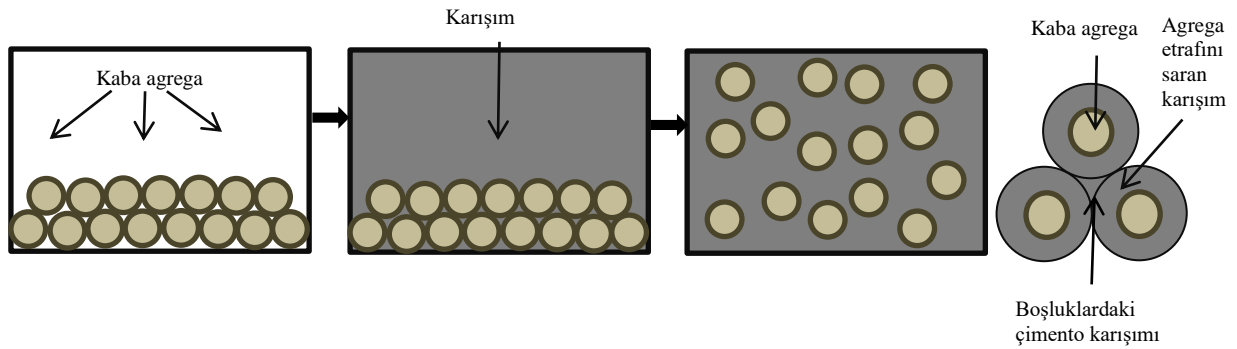
### **Kuruma Büzülmesine Kaba Agregalar ve Polipropilen Lif Etkisi**

Kuruma büzülmesinin önüne geçebilmek veya azaltabilmek için agreganın betonun büzülmesi üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Hansen vd. agregaların, çimento matrisinin büzülmesini önlemede önemli bir rol oynadığını ve bu sayede betonun sertleşmiş çimento macununa kıyasla büzülmesini azaltabildiğini bildirmiştir (Hansen 1987, Hansen ve Almudaiheem 1987). Fujiwara (2008), agreganın esas amacının betonun hacimsel değişimini sınırlamak olduğunu belirtmiştir. Goto ve Fujiwara (1976) ise kullanılan agreganın su emme miktarına göre büzülme davranışını etkilediğini belirtmişlerdir. Düşük yoğunluğa sahip agregaların normal agregalara göre büzülme miktarını daha iyi engellediğini bildirmiştir. Bu durumu kullanılan agregaların iç yüzey alanlarına bağlı olarak değiştiğini açıklamışlardır.

Zhu vd. (2016) kaba agregaların kuruma büzülmesine olan etkisini yaptıkları çalışmada açıklamışlardır. Buna göre kaba agregaların yapının iskeletini oluşturduğunu, agregaların arasında kalan boşlukların ise harç ile dolduğunu belirtmişlerdir. Kurutma sırasında harç su kaybederek büzülme eğilimine girdiğini ve agregaların da bu büzülme eğilimini engelleyerek büzülme miktarının azalmasını sağladığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda kaba agrega hacmi azaldığında, agregaların etrafını saran harç kalınlığı arttığından büzülme miktarının bariz bir şekilde arttığını belirtmişlerdir. Hobbs ise aynı su-çimento oranına sahip numuneler için betonun Young modülü ve agrega boyut oranına bağlı olarak beton büzülmesinin farklılaştığına dikkat çekmiştir. Farklı büyüklükteki agregaların harç üzerinde farklı kısıtlama gerilimi uyguladığını belirtmiştir (Hobbs 1974). Grassl vd. ise agrega boyut dağılımı ve miktarına bağlı olarak yapmış oldukları sonlu elemanlar çalışmasında, agrega boyutlarının büyümesiyle çatlak genişliklerinin arttığı ve geçirgenliğin de buna bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir (Grassl vd. 1995). Wallah ise yüksek oranda agrega içeriğinin, yüksek modüllü veya pürüzlü yüzeyli agregaların daha büzülme karşı daha fazla direnç oluşturduğu ve büzülme miktarını azalttığını bildirmişlerdir (Wallah 2009).

Karışımın katılaşma sırasında büzülmesinin, malzemenin çatlamasına neden olabilecek ana sebep olduğu ve agreganın karışımın büzülmesini kısıtladığı ve sonuç olarak çimento türü ve geopolimer malzemelerin tüm büzülmesini azaltacağı düşünülmektedir (Fujiwara 2008). Son zamanlarda büyük agregaların betonun büzülmesine olan etkisi üzerine araştırmalar artmıştır. Hansen vd. agregaların çimento büzülmesini agrega içermeyen betona göre önemli ölçüde engelleyebilen bir katkı olduğundan bahsetmişlerdir (Hansen 1987, Hansen ve Almudaiheem 1987, Hobbs 1974, Özbay 2010). Fujiwara ve Goto ise agregaların, betonun toplam büzülmesini önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir (Goto ve Fujiwara 1976). Tangtermsirikul yapmış olduğu çalışmada kullanılan agreganın çeşitinin, boyut dağılımının ve agreganın sertlik değerinin betonun büzülmesi üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir (Tangtermsirikul ve Tatong 2001).

Zhu vd. agregaların çimento karışımı içerisinde iskeleti oluşturduğunu, çimento karışımının ilk önce agregalar arasındaki boşlukları doldurduğunu, fazla gelen miktarın da agregaların yüzeylerini kapladığını ve karışımın akışkanlığına katkıda bulunduğunu bildirmişlerdir (Zhu vd. 2016).



**Şekil 2.10** Agregada dispersiyon modeli.

Agreganın büyüklüğü ve kapladığı hacim miktarı arttıkça agregaların etrafını saran karışım miktarının azaldığını ve agregaların etrafını saran karışım kalınlığının, kuruma büzülmesi ile doğru orantılı olarak değiştiğini bildirmişlerdir (Şekil 2.10) (Zhu vd. 2016). Kısacası agregaların etrafını saran karışım miktarının kalınlığı, malzemenin kuruma büzülmesi üzerinde baskın rol oynamaktadır. Agreganın hacimsel miktarı sabit tutularak yalnız boyutları artırılarak da karışım çamurunun kalınlığının azaltılacağı ve böylece kuruma büzülmesi miktarının azaltılacağı Bissonnette vd tarafından açıklanmıştır (Bissonnette vd. 1999). Ancak

Zhu vd. yapmış oldukları çimento içerikli çalışmada, karışım içerisine maksimum %33 oranında kaba agrega eklenebileceği, bu miktardan daha fazla eklenen agregaların karışımın akış özelliklerini ve işlenebilirliğini bozduğunu açıklamışlardır (Zhu vd. 2016).

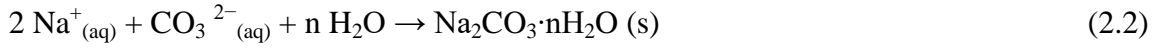
Geopolimerlerin kuruma büzülmesi, mikro gözenekli ağın ıslak ve kuru bölgeleri arasında oluşan yüksek kılcal basınçtan kaynaklanmakla birlikte bu durum numune deformasyonuna ve çatlakların başlamasına yol açmaktadır. Kuruma büzülmesini kontrol etmek için genellikle kılcal gözenekliliği en aza indirmek ve kürlenme sırasında su kaybını kontrol etmek için gözenek yapısının modifikasyonu ve inert veya reaktif dolgu maddeleri ve liflerin yapıya dahil edilmesi gibi yöntemler izlenebilir. Literatürde birkaç çalışma, fiber içeriği, fiber modülü ve fiber-bağlayıcı etkileşiminin, güçlendirilmiş geopolimer kompozitlerin büzülmesini kontrol etmede baskın faktörler olduğunu göstermiştir. Polipropilen fiberlerin geopolimer malzemenin sünekliğini artırması sebebiyle kuruma büzülmesini azalttığı söylenmektedir. Fiberlerin etkisi; matriks, fiber tipi, fiber uzunluğu, fiber şekli, fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, matriks-fiber arayüzeyi ile doğrudan bağlantılıdır. Polipropilen fiberlerin hacimce %0,5 gibi küçük miktarlarda bile yapıya dahil edilmesi, kompozit numunelerin kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmıştır. Fakat %2'nin üzerinde sisteme eklenen elyaf içeriği için olumsuz bir etki göstermiştir. Bu durum fazla miktarda eklenen fiberlerin geopolimer ağ yapısının oluşumuna engel olması ile açıklanmaktadır. Bu durumun kuruma büzülmesinde artışa dahi sebep olabileceği söylenmektedir. Fazla miktarda eklenen lif içeriği aynı zamanda karışımın akışkanlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Pürüzsüz yüzeye sahip olan polipropilen lif içeriği geopolimer-lif arasındaki bağlantının sağlam bir şekilde oluşmasına imkan vermemekle birlikte fazla miktarda eklenmesi durumunda mukavemet değerlerinde bozulmalara dahi neden olabilmektedir (Ranjbar vd. 2016).

### 2.3.3.2 Çiçeklenme

Çiçeklenme beton yapı yüzeylerinde sık görülen bir problemdir. Yüzeyde ya da yüzeye yakın bölgelerde oluşan beyaz renkte tuz birikintisi çiçeklenme olarak adlandırılmaktadır. Kuruma esnasında yüzeye difüze olmuş  $Ca^{2+}$  iyonlarının yüzey sıvısında çözülmüş olan  $CO_2$  ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan  $CaCO_3$  olarak nitelendirilmektedir (Dow ve Glasser 2003). Çiçeklenme, üç ana faktörün bir arada bulunması ile gerçekleşir. Bunlar; çözünen bileşenlerin varlığı, çözünen içerikleri çözmek için suyun varlığı ve çözeltiye kılcal etki, buharlaşma vb. gibi yüzeye doğru hareket ettiren bir taşıma kuvvetidir (Allahverdi vd. 2014). Hem Portland



çimentosu hem de alkali aktif çimentolarda çiçeklenme, esas olarak karbonatlardan kaynaklanmaktadır. Geopolimerler çimentoya göre daha az miktarda Ca içermesine rağmen geopolimerlerde de benzer sorunlarla karşılaşmıştır (Zhang vd. 2013, 2018). Kalsiyum karbonatlar portland çimentosunda çiçeklenmeye neden olurken, geopolimerlerde sodyum karbonatlar bu soruna neden olmaktadır. Skvara vd. geopolimerleşme sırasında reaksiyona girmemiş sodyumun CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girdiğini çiçeklenmeye neden olan bileşiğin sodyum karbonat olduğunu (Škvara vd. 2008) aşağıda sunulan reaksiyon (2.1) ve (2.2) deki gibi gerçekleştiğini açıklamaktadırlar.



Portland çimentosu için sadece renk değişimine sebep olduğu için genellikle zararsız olarak nitelendirilen çiçeklenme, geopolimer malzemeler için zararsız olarak nitelendirilememektedir. Bunun sebebi; çimentodan daha yüksek miktarda alkali içeriğe sebep olması nedeniyle nemli hava ve su ile uzun süre temasta bulunması sonucu malzemelerde görsel probleme ek olarak malzeme bütünlüğünün bozulmasına sebep olması ve yıkıcı etkilerle yol açmasıdır (Allahverdi vd. 2014).

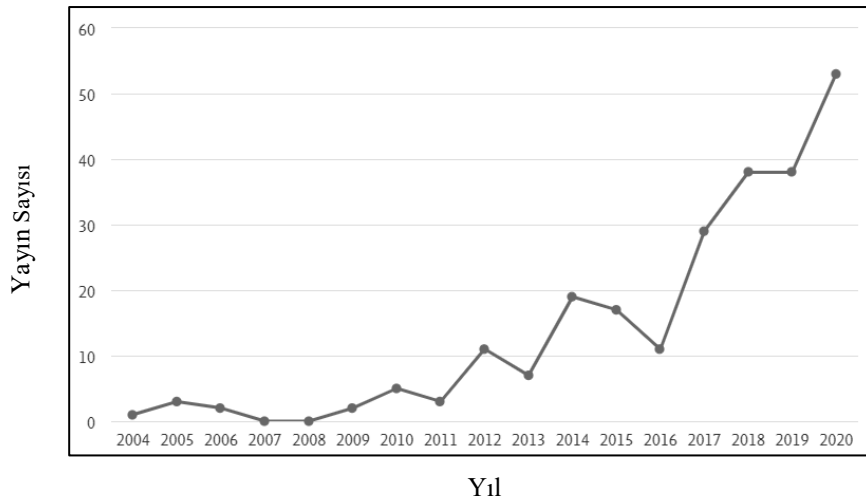
OH<sup>-</sup> ve Na<sup>+</sup> iyonlarının geopolimer sistemi içindeki mevcudiyeti, sodyum karbonat hidratların oluşmasını tetiklemekle birlikte yüksek alkalilik, CO<sub>2</sub>'nin sulu ortamla reaksiyonunu hızlandırmaktadır (Dow ve Glasser 2003). Ayrıca, Na<sup>+</sup> katyonlarının alüminosilikat ağında K<sup>+</sup> katyonlarından daha hızlı hareket edebilmesi gerçeği, yüksek molaritelerdeki tepkimeye girmemiş iyonların artmasından dolayı daha yıkıcı çiçeklenme sorunlarına yol açmaktadır (Allahverdi vd. 2014). Bu durum Szklorzova vd. tarafından sodyum katyonlarının alüminosilikat ağ yapısına zayıf bağlı olması sebebine bağlanmaktadır (Szklorzová ve Bílek 2008).

### 2.3.4 Köpük Geopolimer

Alkali ile aktive olan geopolimer köpüklerin geliştirilmesinde bugüne kadar yapılan araştırma çalışmaları gün geçtikçe artmakta, geopolimer köpüklerin potansiyel kullanım alanları birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir. 2004-2020 yılları arasında geopolimer köpükler ile

ilgili yapılan yayın sayıları sistematik bir biçimde incelendiğinde de Scopus Kasım 2020 verilerine göre giderek artan bir trendde araştırmaların sürdüğü gözlemlenmiştir (Şekil 2.11). Ancak hali hazırda sadece 239 adet yayının bulunması bu alanda hala doldurulması gereken bir boşluk olduğunu ve geopolimer köpük alanında yapılacak çalışmaların önemini göstermektedir.

TROLIT adı verilerek patentlenen geopolimer köpük özellikleri ve son zamanlarda yapılan geopolimer köpük çalışmalarının incelendiği; kullanılan hammadde, alkali aktivatörü, köpük ajanı, elde edilen mukavemet, yoğunluk, ısıl iletkenlik ve gözenek boyutlarının incelendiği karşılaştırmalı veriler Çizelge 2.3 'de sunulmuş ve tez çalışmasında elde edilen veriler de en altta bu çalışma adı altında sunulmuştur.



Şekil 2.11 Geopolimer köpükler ile ilgili yapılan yayın sayılarının gösteren SCOPUS verileri.

**Tablo 2.3** Geopolimer köpük alanında yayımlanan önemli yayınlar.

Hammadde	Aktivatör	Katkı	Agrega	Köpük Ajanı	Gözenek Boyutu	Mukavemet (MPa)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik (W/mK)	Referanslar
TROLIT	-	-	-	-	0.5-3.0mm	0,5-2	200-800	0,037	(Liefke 1999)
Kaolen	NaOH Sodyum Silikat Su	-	$\alpha$ -kuvars Öğütülmüş Granit	-	-	86	1430-1890	0.55-0.91	(Subaer Van Riessen 2007)
Perlite	NaOH Su	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	700 $\mu$ m-2.08mm	0.25-0.80	335-665	0.03-0.053	(Vaou Panias, 2010)
Kaolen	NaOH Sodyum Silikat	Alkoksilan	-	Al Tozu Zn Tozu	0.1-5mm	70	45-1180	0,113-0,53	(Yang, Chou, Chien, 2012)
Metakaolen Halloysit Kil	NaOH KOH Sodyum Silikat SiO <sub>2</sub> Nano Tozu	Etil akrilat and Metil metaklarat	Genleştirilmiş Cam Kürecikleri Kuvars Kumu	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.44-0.92mm	1.8-5.2	330-850	0.109-0.170	(Palmero, Formia, Antonaci, Brini, Tulliani, 2015)
Uçucu Kül	Su sodyum silikat	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	0.4-1.43	270-375	0.071-0.092	(Feng vd. 2015)
Uçucu Kül Yüksek Fırın Cürufu	NaOH Sodyum Silikat Saf Su	-	-	Köpük Ajansı	-	3.0-50.0	600-1500	0.15-0.5	(Zhang vd.2015)
Uçucu Kül	NaOH Sodyum Silikat Çeşme Suyu	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	1.9-3.4	400-650	0.083-0.127	(Łach vd. 2016)
Uçucu Kül Metakaolen	NaOH Sodyum Silikat Saf Su	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	0,26-21	440-1100	0.082-0.227	(Novais vd. 2016)
Metakaolen Uçucu Kül	NaOH Sodyum Silikat	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	1,23	560	0,107	(Novais vd. 2016)

**Tablo 2.3 (Devamı)** Geopolimer köpük alanında yayımlanan önemli yayınlar.

Hammadde	Aktivatör	Katkı	Agrega	Köpük Ajamı	Gözenek Boyutu	Mukavemet (MPa)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik (W/mK)	Referanslar
Metakaolen Atık Cam Alüminyum Atığı Yüksek Fırın Cürufu	NaOH Sodyum Silikat	-	-	-	1-5 mm	1.1-2.0	380-470	0.14-0.15	(Dembovska vd. 2017)
Metakaolen Uçucu Kül	KOH Potasyum Polisilikat	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.0058- 1000 µm	0,6	313	0,73	(Murri vd. 2017)
Kil	NaOH Sodyum Silikat	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50-200 µm	1.57-2.97	860-1090	0.267-0.349	(Zaidi vd. 2017)
Uçucu Kül Metakaolen	NaOH Sodyum Silikat Saf Su	-	Yıkıntı Atıkları	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.198-31.88 µm	3.6-11.9	1000-1700	0.19-0.44	(De Rossi vd. 2018)
Uçucu Kül Yüksek Fırın Cürufu	NaOH Sodyum Silikat Su	SDS	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0-2mm	3.2-44.8	140-1020	0.183-0.646	(Xu vd. 2018)
Uçucu Kül Metakaolen	NaOH Sodyum Silikat Su	Sümfaktan	-	-	-	0,6-403	430-850	0.079-0.170	(Novais vd. 2018)
Uçucu Kül Metakaolen	NaOH Sodyum Silikat Su	-	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.57-1.13mm	0.68-2.23	150-300	0.0622-0.0852	(Wu vd. 2018)
Uçucu Kül	-	Kalsiyum stearat	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	140 -4563 µm	1.45-1.65	310-360	0.095-0.139	(Cui vd. 2018)
Atık Cam Metakaolen	KOH Potasyum Silikat saf su	Triton X-100	-	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50-700 µm	1.2-5.5	270-480	0.110-0.150	(Bai vd. 2019)

### 2.3.2.1 Köpük Geopolimer Üretimi

Gözenekli seramikler yüksek geçirgenlikleri, yüksek yüzey alanları, yüksek sıcaklık dayanımları, düşük yoğunlukları ve düşük ısıl iletkenlik özelliklerinden dolayı ilgi görmeye başlamıştır. Gözenekli malzemeler genellikle filtreleme uygulamaları, ses ve ısı yalıtımı, düşük yoğunluklu yapı malzemesi (Gonzenbach vd. 2006b, Scheffler ve Colombo 2005) gibi birçok alanda kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Gözenekli malzemeler için toplam gözeneklilik miktarı, gözenek boyutu dağılımı, gözeneklerin bağlantıları ve özgül yüzey alanı gibi özellikler önem arz etmektedir. Hem malzemenin mekanik mukavemetinde hem de malzemenin kullanım alanının belirlenmesinde bu parametreler etkilidir (Gonzenbach vd. 2006b).

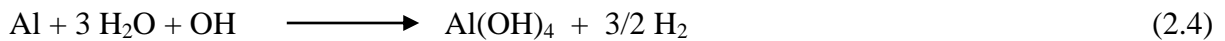
Gözenekli seramikler üretmek için replika, doğal şablon ve doğrudan köpürtme gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler, üretilen seramiklerin özelliklerinde, gözenek boyut dağılımında, gözeneklilik oranında ve ürünlerin fiziksel özelliklerinde farklılıklara neden olmaktadır (Gonzenbach vd. 2006b).

Replika tekniği ile açık gözenekli seramik üretiminde gözenek boyutları 200µm-3mm arasında değişmekte ve % 40-95 oranında gözenekliliğe ulaşmak mümkündür (Innocentini vd. 1998). Replika tekniğinde, süspansiyona daldırılan polimerik sünger, gözenekli bir seramik üretmek için yakma işlemine tabi tutulur (Pu vd. 2004). Yöntemin basitliğinin aksine polimerik süngerin pirolizi sırasında oluşabilecek çatlaklar problem oluşturmakta ve ürün mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. Ahşap yapıların pozitif kalıp olarak kullanıldığı yöntemle de gözenekli seramik üretmek mümkündür. Fakat ahşap şablonu gözenekli seramiğe dönüştürmek uzun bir proses gerektirmekle birlikte maliyetli bir işlemdir (Ható vd. 2013). Açık gözenekli seramikler, uçucu bileşik içeren şablon yöntemi ile de üretilebilir. Bu yöntemde 1-700 µm aralığında,% 20-90 miktarında gözenekler oluşturmak mümkündür (Studart vd. 2006). Uçucu bileşik içeren şablon işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli konu piroliz oranıdır. Çatlamayı önlemek için yavaş ısıtma, uzun işlem süresi nedeniyle büyük parçalar için uygun değildir (Colombo vd. 2004).

Hem açık hem de kapalı gözenek yapısına sahip % 40 ile % 97 arasında gözenek içeren seramikler doğrudan köpürtme yöntemiyle kolaylıkla üretilebilmektedir. Bu yöntem seramik

çamurunda doğrudan gözenek oluşturma yöntemine dayanmakta ve pirolize ihtiyaç duymadan gözenek oluşumunu sağlamaktadır. Doğrudan köpürtme yönteminde piroliz işlem basamağının olmaması sayesinde, hücre duvarlarında herhangi bir kusur ve çatlak oluşmamakta ve bu da diğer yöntemlere nazaran daha yüksek mukavamete sahip ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemde, homojen boyut dağılımlı gözenek eldesi için bulamacın reolojik özelliklerinin araştırılması ve ilave katkıların kullanılması gerekmektedir (Studart vd. 2006).

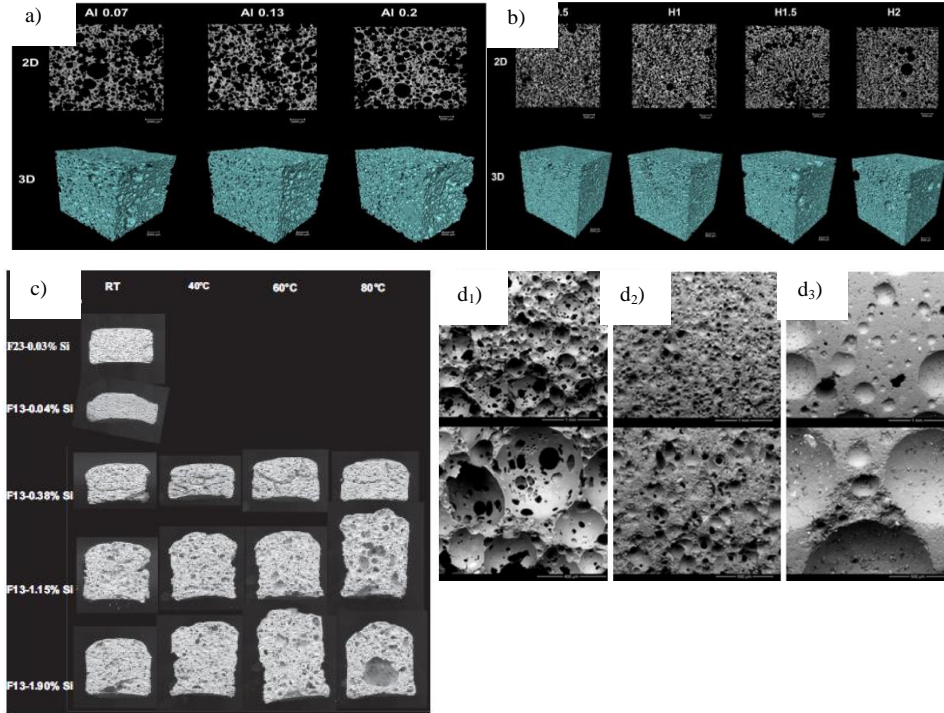
Gözenek üretimi için kullanılacak yöntem, ürünün kullanım amacına, üründen beklenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak değişmekle birlikte, doğrudan köpürtme yöntemi daha ucuz ve daha kolay bir yöntemdir. Bu nedenle geopolimer köpük, birçok çalışmada (Cilla vd. 2014, Korat ve Ducman 2017, Novais vd. 2016, Vaou ve Panias 2010, Tsung-yin Yang vd. 2012) doğrudan köpürme yöntemi ile hazırlanmıştır. Doğrudan köpürtme yöntemlerinde, gözenekli malzemeler, havanın bir süspansiyon veya sıvı ortama dahil edilmesiyle üretilir. Geopolimer bulamacında hapsolmuş gaz, toplam gözenekliliği etkilemektedir ve gözenek boyutu, karışımın set olma özellikleriyle ilişkilidir (Studart vd. 2006). Seçilen köpürtücü ajan ve eklenme miktarı sertleşmiş köpüklerin boyutu ve dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Masi vd. 2014). Köpürme genellikle geopolimer çamura  $H_2O_2$  (Vaou ve Panias, 2010), Al tozu (Zhang vd. 2014), metalik Si (Medri vd. 2013) ve sodyum perborat (Svingala 2009) ilave edilerek ve mekanik olarak karıştırılarak yapılmaktadır. Alkali çamur içerisindeki katkı maddelerinin ayrışması sonucunda kabarcık oluşmakta ve denklem (2.3), (2.4) ve (2.5) 'de gösterildiği şekilde reaksiyon sonucu çıkan gazlar sayesinde gözenekli bir yapı oluşmaktadır.



Köpük oluşturuvcu katkıların geopolimer köpükler üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan köpük oluşturuvcu katkı miktarındaki artışın kullanılan katkı türünden bağımsız olarak mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği belirtilmiştir. Ducman ve Korat, yaptıkları çalışmada,  $H_2O_2$ 'nin oluşturduğu gözeneklerin Al

tozunun oluşturduğu gözeneklere göre daha küçük ve daha homojen dağılımlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Ducman ve Korat 2016). Masi vd. düşük köpük oluşturucu konsantrasyonlarında homojen gözenekler oluştuğunu, kullanılan miktarın artmasıyla gözeneklerin çöktüğü gözlemlenmiştir (Masi vd. 2014). Medri vd. yaptıkları çalışmada, köpük yapıcı madde olarak metalik Si kullanmış, köpüklerde ultra makro boyutta ve düzensiz dağılımlı olduklarını gözlemlemişlerdir. Ayrıca kürlenme sıcaklıklarının artışıyla hacimce daha yüksek ve daha hızlı genleşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek miktarda metalik Si tozu kullanarak oluşturulan köpüklerde ise geopolimerizasyon reaksiyonlarının engellendiğini ve mekanik özellikleri olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir (Medri vd. 2013). Cilla vd. ticari bitkisel yağ ile yaptıkları çalışmada ise yağın alkali ortamda sabunlaşma reaksiyonunun gerçekleşmesi sonucu kapalı gözeneklilik oluşumunu gözlemlemişlerdir (Cilla vd. 2014). Köpük oluşturucu katkıların miktarsal anlamda belirli bir eşiği aştıklarında, gözenek bağlanmasının ve gözenek formlarının bozulduğu gözlemlenmiştir (Gonzenbach vd. 2006a, 2007, Studart vd. 2006). Köpük oluşturucu katkılarıyla hazırlanan geopolimer köpüklere ilişkin bazı resimler Şekil 2.12'de verilmiştir.

Sıvı köpükler, yüksek gaz-sıvı ara yüzey alanlarından dolayı termodinamik olarak kararsızdır. Bu nedenle drenaj, kremleşme ve Ostwald olgunlaşması gibi birçok fiziksel süreç stabiliteyi bozmakla birlikte karışım içinde geniş gözeneklerin oluşmasına neden olmaktadır. Sistemin stabilitesini sağlamak, gözenek boyutu dağılımını kontrol etmek ve gaz sıvı arayüzündeki açıyı azaltmak için sürfaktan adı verilen katkı maddelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sürfaktanlar, yüzey aktif maddeler olarak bilinmektedirler. Sürfaktanlar, molekülde hidrofilik bir baş grubunun ve hidrofobik bir zincir (veya kuyruk) varlığı sebebiyle olağandışı özelliklere sahiptirler. Polar veya iyonik baş grubu genellikle sulu bir ortamla güçlü bir şekilde etkileşime girmesi durumunda dipol-dipol veya iyon-dipol etkileşimleri yoluyla çözülür ve polar kafa grupları yüzey aktif maddeleri anyonik, katyonik, iyonik olmayan ve zwitteriyonik gibi farklı kategorilere ayırır (Schramm vd. 2003). Sürfaktanlar gaz kabarcıklarını birbirlerinden ayırarak birleşmelerini engeller. Ayrıca sürfaktanların gözeneklerin daireselliğini artırmakta ve böylece köpük geopolimerin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Gözeneklerin boyutu ve şekli, bağlayıcının mukavemeti köpük geopolimerlerinin mukavemet gelişiminde çok önemlidir (Hajimohammadi vd. 2017).



**Şekil 2.12** Köpük oluşturuıcı katkılarla hazırlanan geopolimer köpüklere ilişkin bazı resimler. (a) Köpük oluşturuıcı olarak Al tozunun kullanıldığı çalışmada geopolimer köpüklerin mikro-tomografisi ile elde edilen kesit görüntülerin (XY) ve 3D görüntüler ile incelenmesi (çubuk 2 mm'yi temsil etmektedir) (b) Köpük oluşturuıcı olarak  $H_2O_2$  kullanıldığı çalışmada geopolimer köpüklerin mikro-tomografisi ile elde edilen kesit görüntülerin (XY) ve 3D görüntüler ile incelenmesi (çubuk 2 mm'yi temsil etmektedir) (c) Farklı miktarlarda metalik silikon ilaveleri ve farklı kürlenme sıcaklıkları ile elde edilen köpüklerin enine kesitinin yüksek çözünürlüklü fotoğrafları. (d) Farklı proses adımları kullanılarak üretilen geopolimer köpüklerin SEM mikroğrafları (voltage = 20 kV): (d1) sabunlaştırma / peroksit / jel döküm kombine metodu , (d2) sabunlaştırma metodu, (d3) peroksit metodu.

Fosfatlar, fosfonatlar, sülfatlar, sülfonatlar, alkoller, aminler, amidler, pirolinidler, gallatlar ve karboksilik asitler en az bir polar baş ve en az bir apolar kuyruk içeren amfilik bileşikler (hem hidrofilik ve hem de hidrofobik özellikler taşıyan bir kimyasal bileşik) olarak bilinmektedir. Genellikle karboksilik asitler, gallatlar ve aminler en çok tercih edilen sürfaktanlardır. Bu grupların içerisinde ise sırasıyla en çok kullanılan sürfaktanlar enantik asit, bütül galat ve heptilamindir (Turcinskas vd. 2018).

Butirik asit, valerik asit, bütül gallat, propil gallat ve heksilamin gibi birçok yüzey aktif madde türü Gozenbach vd. tarafından çalışılmıştır. Alkil aminlerin, karboksilik asitlerin, alkil



gallatların başarılı olduğunu ve köpüklerin kabarcık büyümesi ve drenajına karşı günlerce stabil kaldığını belirtmişlerdir. Süspansiyona mekanik köpürtme yöntemi uygulayarak, % 45-90 oranında hava içeren ve ortalama kabarcık boyutları 20-80 µm olan köpükler elde etmişlerdir (Gonzenbach vd. 2006b).

Köpük geopolimer ile ilgili çalışmalarda kalsiyum stearat (Cui vd. 2018, Shao vd. 2018), oleik asit (Medpelli vd. 2014), ve albümin (Bai ve Colombo 2017), yüzey aktif maddeler kullanılmış ve maddelerin etkileri araştırılmıştır. Cui vd. kalsiyum stearatın, geopolimer karışımında oluşturulan kabarcıkların boyutunun kontrol ettiğini, kabarcıklar arasındaki yüzey gerilimini önemli ölçüde azalttığını ve stearatın mukavemet artışı üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, kalsiyum stearat kullanmadan hazırladıkları karışımında alkali aktivatörün yüksek yüzey geriliminin, yüzey serbest enerjisini azaltmak için kırılma eğiliminde olduğunu, kabarcıkların oluşumu ve stabilitesine zararlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Karışıma ancak yeterli miktarda kalsiyum stearat eklendiğinde, kabarcıkların yüzey gerilimi azalır ve kabarcıkların birleşerek büyük boşluklar oluşturması önlenmektedir. Aşırı kalsiyum stearat ilavesinin gözenek oluşumu için zararlı olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmıştır. Ayrıca yüksek miktarda eklenen kalsiyum stearatın  $Ca^{+}$  'dan dolayı kürlenme süresini hızlandırdığını da belirtilmiştir (Cui vd. 2018).

Medpelli vd. (2014) ve Cilla vd. (2014) yapmış oldukları geopolimer köpük çalışmalarında alkali ortama sürfaktan olarak yağ eklemişler (trigliserid) ve karışım içerisindeki kabarcıkların stabilizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarına göre, alkali geopolimer karışımına eklenen bitkisel yağ, sabunlaşma reaksiyonu ile in situ karboksilat yüzey aktif maddelere (sabun molekülleri) dönüşmektedir. Medpelli vd. (2014) karışımın kürlenmesi sırasında damlacıkların içindeki yağın sabunlaşma reaksiyonuna girmeye devam ettiğini, trigliseritlerin tümünün sabun ve gliseride dönüştüğünü tespit etmişlerdir.

Medpelli vd. (2014) çalışmalarında köpürtücü kullanmadan 1:1, su:yağ oranında bitkisel yağ ekleyerek gözenekler elde etmeye çalışmışlardır. Hazırladıkları numunelerde kapalı formda gözeneklerin oluştuğunu belirtmişlerdir. Cilla vd. (2014) de aynı şekilde geopolimer karışımlarının içerisine bitkisel katkıları eklemişlerdir. Medpelli'nin çalışmasından farklı olarak karışım içerisine  $H_2O_2$  peroksit ekleyerek köpük numuneler hazırlamışlardır. Karışıma

peroksit ilavesiyle gözeneklerin açık forma geçtiği ve birbirine bağlantılı şekilde oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Gözenek boyutu miktarının doğrudan kullanılan yağın cinsine, yağ miktarına, karışımdaki su miktarına ve alkali miktarına göre değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Bai vd. (2017) sürfaktan olarak kullandıkları albüminin gözenek boyut dağılımı ve mekanik performans üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Albümin içeriğinin artmasıyla toplam gözenek miktarının azaldığını ve gözenekler arasındaki bağlantının azalarak kapalı formda gözeneklerin oluşmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında köpürtücü olarak kullandıkları H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarını arttırdıklarında ise gözenekler birbirine bağlanmıştı.

Holmberg vd. (2002).birbiri ile bağlantılı gözenek oluşum mekanizmasını açıklamışlardır. Çalışmalarına göre köpürtücü miktarındaki artışın, gözenekler arasındaki çamur tabakasını azalttığını ve kılcal kuvvetin etkisiyle çamurun hacmini arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kabarcıkların birbirlerinin iç basınçlarını karşılayamaması sonucu gözeneklerin patlayıp birbirine bağlantılı gözeneklerin oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

Geopolimer köpüklerin stabil ve homojen yapısı, hazırlanan çamurun reolojik özelliklerine de bağlı olarak değişmektedir. Homojen dağılıma sahip gözeneklerin eldesi, köpük oluşma ve karışımda stabil kalabilme özellikleri karışımın viskozitesi ile yakından ilişkilidir. Geopolimer karışımının viskozitesinin ne gözenek oluşumunu önleyecek kadar yüksek, ne de oluşan kabarcıkların çamurdan uzaklaşmasına izin verecek kadar düşük olmamalıdır. Bu nedenle karışıma eklenen su miktarı önem arz etmekle birlikte optimum değerlerde tutulmalıdır. Geopolimer karışımına eklenen su sadece karışım ortamını hazırlamakta ve reaktif bileşelerin reaksiyon alanlarına taşınmasında gereklidir (Taxiarchou vd. 2013), (Yang vd. 2008). Karışım içerisinde bulunan su geopolimerzasyon reaksiyonunda yer almaz (Yang vd. 2008).

Geopolimer köpük özelliklerini iyileştirmek, ekstrem koşullarda daha iyi performans göstermelerini sağlamak için geopolimer karışımlarına katkı ve kimyasallar eklenmektedir (Aleem ve Arumairaj 2012). Bu katkı maddeleri temel olarak süperplastikleştiriciler (süperakışkanlaştırıcılar) olarak bilinmekler birlikte genellikle lignosülfonatlar (Lig), naftalen (N), melamin esaslı katkıları (M) ve modifiye polikarboksilatlar (PC) kullanılmaktadır (Rixom ve Mailvaganam, 1999). Naftalin sülfonat esaslı süperplastikleştiriciler, işlenebilirlik

özelliklerini iyileştirmek amacıyla uçucu kül esaslı geopolimer karışımlarına %4 oranına kadar eklenebilmesine rağmen, % 2 sınırı aşıldığında basınç dayanımında bozulmalar gözlemlenmektedir (Brito vd. 2007, Nematollahi ve Sanjayan 2014). Tüm bu bilgilere ek olarak, birçok araştırmacı tarafından süperplastikleştiricilerin alkali ortamlarda işlevlerini kaybettikleri ve geopolimerler için uygun olmadıkları söylenmektedir (Brooks vd. 2000, Puertas ve Vázquez 2010). Nematollahi vd. süperakışkanlaştırıcıların geopolimerler üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yapmış oldukları çalışmada, kullanılan katkıının alkali ortamın pH'ına ve kullanılan alkalizörlerin türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini açıklamıştır. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcıların, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile hazırlanan uçucu kül bazlı geopolimerler için uygun olduğu söylenmektedir. Sodyum hidroksit ile hazırlanan cüruf geopolimerleri için en uygun süperplastikleştiricinin ise naftalen esaslı olduğu ve aktivitesinin pH'a bağlı olarak değiştiği söylenmektedir (Nematollahi ve Sanjayan 2014).

## **2.4 Geopolimer Özelliklerini Etkileyen Faktörler**

### **2.4.1 Molarite**

Geopolimerizasyon reaksiyonlarında hammadde özelliklerinin yanı sıra geopolimer karışımının molaritesinin geopolimer malzemenin özelliklerini etkilediği birçok araştırmacı tarafından paylaşılmıştır (Huseien vd. 2018, Jaya vd. 2018, Livi ve Repette 2017, Madheswaran vd. 2013, Mustafa vd. 2011, Razak vd. 2015). Alüminosilikat minerallerinin Si ve Al içeriklerinin karışım içerisinde yüksek çözünür olması için güçlü bir alkali ortam gereklidir. Bu alkali ortam, aktivatör olarak adlandırılan tekli veya kombine alkali içerikli çözeltilerle elde edilebilmektedir (De Vargas vd. 2011). Yaygın olarak NaOH, KOH, sodyum silikat ve potasyum silikat alkali ortamın oluşturulması için kullanılan aktivatörlerdir (Barbosa vd. 2000, Palomo vd. 1999, Xu ve Van Deventer 2000).

Geopolimer kompozisyonunun hazırlanmasında kullanılan ideal alkali aktivatör miktarı yani molarite, basma mukavemetinin üzerinde oldukça fazla etkiye sahiptir. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltilerde alüminosilikat minerallerinin daha iyi çözüldüğü ve daha iyi bir geopolimerleşmenin sağlandığı Alvarez-Ayuso vd. tarafından ortaya konmuştur (Álvarez-Ayuso vd. 2008). Fakat yüksek molaritelerde hazırlanan karışımda biriken OH<sup>-</sup>

iyonlarının geopolimerizasyon reaksiyonlarını engellemesi sebebiyle mukavemet değerlerinde kayıp yaşanması mümkündür (De Vargas vd. 2011, Razak vd. 2015). Bu sebeple optimum molaritenin bulunması ve optimum aralıkta çalışılması önem taşımaktadır. Tüm bunlara ek olarak sadece sodyum hidroksit ile hazırlanan geopolimer mukavemetlerinin sodyum silikatlı geopolimerlere göre daha düşük olacağından bahsedilmiştir. Bunun sebebi olarak ise Si çözünme hızının Al'a göre yavaş olmasından bahsedilmiştir. Alüminosilikat hammaddesinden hızlı çözünen Al, alkali çözelti içerisinde bulunan Si ile reaksiyona girerek alüminosilikat oligomerlerinin hızlı şekilde oluşumunu sağlayacak ve bu sayede sodyum hidroksit ile hazırlanan jopolimer karışımına göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olacaktır (Li vd. 2010).

#### 2.4.2 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Oranı

Davidovits iyi bir geopolimerleşme reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için bazı oranlar belirlemiştir. Metakaolen esaslı geopolimerler için SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının 3.3-4.5 aralığında olmasının iyi bir geopolimerleşme için önemli olduğunu vurgulamıştır. Buna ek olarak (Na-K)<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> oranının 0.2-0.48 aralığında, (Na-K)<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının 0.8-1.6 aralığında ve H<sub>2</sub>O/(Na-K)<sub>2</sub>O için 10-25 aralığında olmasının güçlü bir geopolimer yapısının oluşması açısından etkin olduğunu bildirmiştir (Davidovits, 2008). Uçucu kül esaslı geopolimerler için ise Shi vd. Si/Al oranının 2.0-5.0 arası, Na/Al oranının 1.0 dolaylarında ve metakaolen esaslı geopolimerlerin Si/Al oranının 1.8-2.0 arası, Na/Al oranının 1.0 dolaylarında olmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir (Shi vd. 2011).

De Silva vd. geopolimerleşmenin SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı ile kontrol edildiğini bildirmiştir. Karışım içerisindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarındaki artışın SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının azalmasına sebep olacağından, geopolimerleşmenin yavaşlaması ve basma mukavemet değerinin azalmasından bahsetmişlerdir (Silva vd. 2007). Weng ise Al'nin Si'a göre daha hızlı çözünerek çözeltiliye dâhil olduğunu bildirmişlerdir (Weng ve Sagoe-Crentsil 2007). Temelde Pauling'in yarıçap oranı kanununa dayanan Lowenstein kuralına göre (Lowenstein 1954), [AlO<sub>4</sub>] tetrahedrasının kendi arasında bağ oluşturmadığı düşünülmesine rağmen, Provis vd. (Provis vd. 2005) çözeltilideki düşük silikat içeren durumlarda Al-O-Al bağının oluşma ihtimalinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebepten sodyum silikat içeren alkali karışımların sadece

sodyum hidroksit ile hazırlanan karışımlara göre çok daha yüksek mukavemete sahip olduğunu bildirmişlerdir (Weng ve Sagoe-Crentsil, 2007).

### **2.4.3 Kürlenme Sıcaklığı ve Süresi**

Kürlenme süresi ve sıcaklığı da geopolimer malzemenin basma mukavemetini etkileyen parametrelerden bir tanesidir (De Vargas vd. 2011, Razak vd. 2015). Daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşmak hedeflendiğinde, numunelerin kürleme sıcaklığının arttırılmasının geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırdığından dolayı sonuçları olumlu etkilediği gözlemlenmiştir (Jaarsveld vd. 2002). Buna ek olarak kürlenme süresinin uzatılmasının da alkali iyonlarda silis ile alümina arasındaki reaksiyonların devam etmesini sağladığından basma mukavemetinin artışı sağladığı söylenmektedir (De Vargas vd. 2011).

## **2.5 Binalarda Isı Yalıtımı**

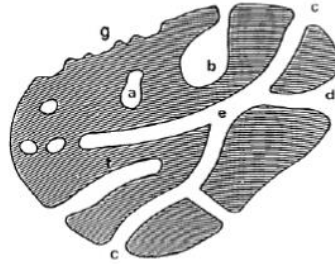
Bir binanın temel işlevi içinde yaşayan insanlar için güvenlik, barınma ve sağlıklı yaşam koşulları sağlamaktır. Bunun yanında içinde yaşayan insanların termal konfor içerisinde yaşamlarını sürdürmelerini sağlamak ise bir gerekliliktir. Bu da uygun bir iklime duyarlı bina tasarımıyla başarılabilir.

Bina dış kabuğu; sıcaklık (güneş radyasyonu ve hava sıcaklığı nedeniyle), hava akımı (konveksiyondan dolayı) ve havadaki nem içeriği (nem) gibi dış evre koşullarına maruz kalmaktadır. Dış ortamdan iç ortama sürekli olarak ısı ve kütle transferi gerçekleşmektedir. Bina dış kabuğunda oluşan ısı transferi, iletken, konvektif ve ışınımlı ısı transferi bileşenlerinin toplamı ile kullanılan malzeme ile malzemenin mikro yapısına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Yapı malzemelerinin beklenen ısıl özellikleri göstermesi kritik önem taşımaktadır. Kullanılan malzemenin yoğunluğu, spesifik ısı, mikro yapısına bağlı olarak ısıl özellikleri değişmektedir (Hyde 2000).

Yapı malzemeleri katı matris (partiküllerden) ve boşluklardan (gözenek-porozitelerden) oluşmaktadır. Yapı malzemesinde bulunan hammaddenin ve gözenekliliğin yapısını anlamak, termal performans davranışının değerlendirilmesinde önemlidir. Malzemelerin gözenekliliği (gözenek boyutu, dağılımı, türü) ısıl transferinde önemli rol oynamaktadır. Isı transfer

mekanizmasını tam anlamıyla anlamak için malzemenin mikroyapı özellikleri araştırılmalıdır. İlk olarak, malzeme ile ilgili gözenek yapısı ve tanecik yapısının gözlemlenmesi için kapsamlı bir araştırma yapmak gereklidir (Beck vd. 2003).

IUPAC a göre gözenek boyutlarına göre gözenekli katılar 2 nm (20 Å) genişliğe kadar olanlar mikro gözenekler; orta büyüklükteki gözenekler (2-50 nm) mezo gözenekler ve 50 nm'den (0.05 µm) daha büyük gözenekler, makro gözenekler olarak adlandırılır. IUPAC gözenekli katıları gözenek çeşitlerine göre Şekil 2.13'de gösterildiği gibi tanımlamaktadır. Gözenekler, harici bir sıvıya ya da nem erişilebilirliklerine göre iki kategoride sınıflandırılmaktadır. Birinci kategori gözenekler, kapalı gözenekler olarak tanımlanmaktadır. Bu tür gözenekler malzeme içerisinde tamamen izole durumdadır. İkinci kategorideki gözenekler ise sıvı ile temas edebilen kesintisiz ağ yapıya sahip yapılar açık gözenekler olarak tanımlanmaktadır (Rouquerol vd. 1994).



**Şekil 2.13** Gözenekli bir katının şematik kesiti (a) kapalı gözenekler, (b) mürekkep şişesi şekilli gözenek, (c) açık gözenek (veya silindirik), (d) huni şeklinde gözenek, (e) gözenekler arası ve (f) kör gözenek (Rouquerol vd. 1994).

Gözeneklilik miktarı, gözeneklerin şekli, çeşiti, boyut dağılımı gibi faktörler köpük malzemelerin ısı iletkenliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Isı direnci ve yangından korunma açısından bakıldığında ısı iletkenlik özelliği binaların tasarımında belirleyici rol oynamaktadır. Bir yapı malzemesinin termal iletkenliğini değerlendirmek için bileşen katmanların termal iletkenliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Leja ve Prvakova 2008). Düşük termal iletkenlik değerine sahip bir katkı kullanıldığında ya da malzemenin gözenekliliği arttırıldığında termal iletkenlik değerleri düşecektir. Giannakou vd. tarafından yapılan çalışmada köpük malzemenin yoğunluğu her 100kg/m<sup>3</sup> oranında azaltıldığında, termal iletkenlik değerinin de 0.04W/mK oranında azalacağı belirtilmiştir (Giannakou ve Jones 2002).

### 2.5.1 Isı Yalıtım Malzemeleri

Bir malzemenin ısı yalıtım malzemesi olabilmesi için ISO ve CEN standartlarına göre ısı iletkenlik katsayısı ( $\lambda$ ) 0,065 W/mK'den daha küçük olması gerekmektedir. Yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı ne kadar küçük ise, ısı geçişine karşı o oranda yüksek bir direnç gösterir. TS825 standardında ısı iletkenlik hesap değerleri ( $\lambda_h$ ); 23°C sıcaklık ve %80 bağıl nem ortamında belirlenmiş ısı iletkenlik değerleridir (Yaman vd. 2015).

Isı yalıtım panellerinin istenilen performansı karşılaması için yalıtım malzemesinin yüksek miktarda kapalı gözenekliliğe sahip olması, yoğunluğunun mümkün olduğu kadar düşük ve su emme oranının düşük olması gerekmektedir. Sadece ısı iletkenlik göz önünde bulundurularak oluşturulan yapı elemanlarının istenilen sonuçları vermediği bilinmektedir. Isı yalıtımının yanı sıra nem akımı ve yoğuşmanın önemi, yalıtım malzemesinde başka niteliklerin de aranmasını gerekli kılmıştır. Malzemedeki buhar difüzyon direnç faktörünün buharın etkisini azaltmak için yeterli olması, sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenmesi ve ısının yüksek ısıtma sıcaklığının depolanması beklenmektedir (Mattila 2017).

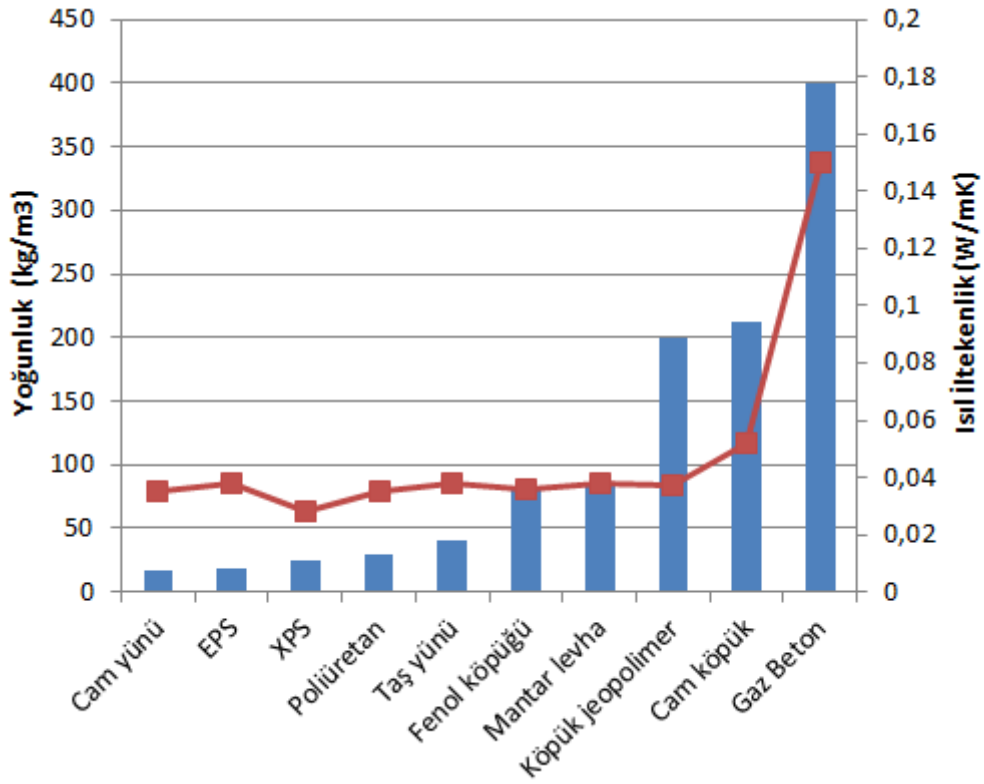
Isı yalıtım malzemeleri organik, inorganik ve organik-inorganik hibrit olmak üzere üç türe ayrılmaktadır. Taş yünü, cam yünü, mineral yün ve genişletilmiş perlitler gibi geleneksel inorganik ısı yalıtım malzemeleri, ısı yalıtımı oluşturmak için insanlar tarafından ilk kullanılan malzemelerdir. Bununla birlikte, esas olarak üretim süreçleri sırasındaki yüksek enerji ve kaynak tüketimleri nedeniyle bu geleneksel inorganik malzemelerin kullanımı kademeli olarak azalmıştır. Bunun yerine, organik yapıları türler günümüzde baskın ısı yalıtım malzemeleri haline gelmiştir. Örneğin, genişletilmiş polistiren, ekstrüde polistiren, polistiren köpük, poliüretan vb. ısı yalıtımı amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. İnorganik tiplerle karşılaştırıldığında, organik ısı yalıtım malzemeleri genellikle çok daha düşük ısı iletkenlik katsayısına (0,02-0,04 W/mK), ultra düşük yoğunluğa (20-100 kg/m<sup>3</sup>), mükemmel süneklik ve su geçirmezlik özelliklerine sahiptir (Mattila 2017). Fakat bu tür malzemeler, organiklere ait olan doğal nitelikleri nedeniyle, ısıtıldıklarında veya alev maruz kaldıklarında genellikle kolayca büzüşebilirler, dayanıksız ve yanıcıdır. Bu da insan yaşamına ciddi zarar verme potansiyeline sahiptir. Çeşitli modifikasyon yöntemleriyle "A sınıfı" ateş direnci, negatif termolabil (sıcaklıkla kolayca deforme olan) davranış kolayca değiştirilemez veya hatta organikler ısıtıldığında ölümcül etkilere sahip zehirli gazlar üretirler. Benzer şekilde, organik-

inorganik hibrid malzemeler de organik yapıya sahip olmaları sebebiyle organiklerin sahip olduğu olumsuz yönler sebebiyle kullanımları sınırlıdır. Sonuç olarak, aynı anda düşük ısı iletkenlik, A sınıfı yangına dayanıklılık, uygun maliyetli ve yüksek mukavemet özelliklerine sahip olan yüksek performanslı inorganik malzemeler, ısı yalıtım uygulamaları için önemli bir alternatiftir (Aktaş 2018).

Şekil 2.14'de de görüldüğü gibi günümüzde çalışmaya devam eden geopolimer köpükler, yoğunluk ve ısı yalıtımı sağlamada geleneksel yalıtım malzemelerine (XPS, EPS, fenol köpük, cam yünü, taş yünü) göre biraz geride kalmaktadır. XPS ve EPS mükemmel yalıtım sağlamasına ve çok düşük yoğunluk değerlerine sahip olmasına rağmen yangın dayanımlarının düşük olması nedeniyle binalarda artık çok fazla tercih edilmemektedir. Bu tür yalıtım malzemeleri yangın esnasında yoğun duman oluşumuna sebep olup, binada bulunan canlıların yangından etkilenmeseler dahi dumandan zehirlenmelerine ve can kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Cam yünü ve taş yünü yoğunluk, ısı yalıtımı ve yanmazlık özellikleri ile öne çıksa da uygulama sırasında yapıştırımda kullanılan malzemeler yanmazlık özelliklerinin kaybolmasına neden olur. (Arslan ve Aktaş 2018). Bu aşamada yanmaz sınıfı olan geopolimer malzemeler ön plana çıkmaktadır. Şekil 2.14'de sunulduğu üzere, geopolimer köpükler performans olarak, yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri açısından incelendiğinde umut verici değerlerin olduğu söylenebilir.

Geopolimer köpükler, geleneksel yapı yalıtım malzemelerine göre üstün özellikleri (ısı kararlılık, yanmazlık ve yeşil üretim süreci) nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmekle birlikte uzun yıllardır çalışılmaktadır. Geopolimer köpük ön çalışmalar Prud'homme vd. (Prud'homme vd. 2010) ve Vaou-Panias (Vaou ve Panias 2010) tarafından yapılmıştır. Isı yalıtımı açısından gözenekli köpük, inorganik bir malzeme olarak geliştirilen ve en bilinen geopolimer köpük ürünü olan 200-800 kg/m<sup>3</sup> yoğunlukta 0.037 W/mK ısı yalıtım değerline sahip TROLIT'tir (Łach vd. 2016).





Şekil 2.14 Ticari yalıtım malzemeleri ve köpük geopolimeri için yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri (Çubuk grafik yoğunluğu gösterir ve çizgi grafiği termal iletkenliği gösterir).

## 2.5.2 Isı İletim Mekanizması

Isıl iletkenlik; iletken, konvektif ve ışınımlı (radyasyon) ısı transferi bileşenlerinin bir kombinasyonu olarak hesaplanmaktadır. Katı madde boyunca iletim  $\lambda_k$ , gaz yoluyla iletim  $\lambda_g$ , hücrelerin içinde taşınım  $\lambda_{ko}$ , hücre boşlukları boyunca radyasyon  $\lambda_r$  bir köpükteki ısıl iletimi sağlayan mekanizmalardır (2.6). Katı ortam ( $\lambda_k$ ) ve gaz ile iletim ( $\lambda_g$ ), atomların uyarılması yoluyla ısı transferini içerirken, konveksiyon ( $\lambda_{ko}$ ), diferansiyel sıcaklık değişiminin neden olduğu molekül hareketi yoluyla ısı transferini içerir; radyasyonlu ısı transferi ( $\lambda_r$ ) ise elektromanyetik enerji yoluyla ısı transferini içermektedir (Gibson vd. 2014).

$$\lambda = \lambda_k + \lambda_g + \lambda_{ko} + \lambda_r \quad (2.6)$$

Katı malzemelerde ısı iletimini termal iletkenlik ( $\lambda$ ) ve termal yayılım ( $a$ ) karakterize etmektedir. Isı iletkenlik Fourier yasası ile tanımlanmaktadır (2.7): ısı akısı,  $q$  (birim zamanda

birim alan boyunca akan ısı miktarı) ve sıcaklık gradyanı  $\nabla T$ .  $\lambda$  nın birimi W/mK ve J/msK'dir.

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2.7)$$

Malzemenin yoğunluğu ( $\rho$ ) ve spesifik ısısı ( $C_p$ ) malzemenin birim hacmi başına termal kapasite verir (birim hacim sıcaklığını bir K °artırmak için gerekli ısı). Termal difüzyon hızı (bir malzemenin ısıısının sıcak taraftan soğuk tarafa aktarılma hızı) de yoğunluk ve spesifik ısıya bağlı olarak değişir (2.8).

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2.8)$$

Köpük bir malzemenin ısı iletkenliğinde katının ısı iletimine etkisi  $\lambda_k$  katının hacim fraksiyonuna ( $\rho/\rho_s$ ) bağlı olarak değişmektedir. Isıl iletkenlik değeri de konveksiyon ve radyasyonun etkisi hesaba katılarak bulunmaktadır. Konveksiyon ile ısı iletimi Grashof sayısı 1000'in üzerinde bir değerde olduğunda hesaba katılmaktadır (2.9).

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T_c l^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (2.9)$$

Denklemden  $g$  yerçekim ivmesi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\beta$  gaz için genleşme katsayısı (ideal gaz için  $\beta = 1/T$ ),  $\Delta T_c$ , bir hücre boyunca sıcaklık farkıdır,  $l$  hücre boyutudur,  $\rho$  ve  $\mu$  gazın yoğunluğu ve dinamik viskozitesidir. Grashof sayısı 1000'e eşitlendiğinde konveksiyon ile ısı iletimi için minimum hücre boyutunu vermektedir. Bu da köpüklerdeki hücre boyutunun 10mm den küçük olduğu durumlarda konveksiyon ile ısı iletiminin tamamen baskılandığını göstermektedir (Gibson vd. 2014, Notario vd. 2015, Qiao vd. 2013). Luikov radyasyon ile ısı iletiminde farklı gözenek boyutlarının ve farklı sıcaklıkların etkisini araştırmış ve 5mm nin altında bulunan gözenek boyutları için radyasyon ile de ısı iletiminin göz ardı edilebileceğini bildirmiştir (Luikov 1964). Söz edilen şartlar altında kapalı gözeneklere sahip yalıtım plakalarında konveksiyon ve radyasyon ile ısı iletiminin gerçekleşmediği vurgulanmaktadır. Fakat birbiriyle bağlantılı şekilde gözenek içeren köpük malzemelerde bağlantıya ve gözenek boyutlarına göre konveksiyon ile ısı iletimi oldukça fazladır (Balaji vd. 2014).

Diğer taraftan radyasyon mekanizması da köpüklerde ısı transferine katkıda bulunmaktadır. Radyasyonla T 'sıcaklığının yüzeyinden daha düşük bir sıcaklıkta bir yüzeyine radyasyonla geçen ısı akışı, Stefan kanunu ile tanımlanmaktadır (2.10).

$$q_r^0 = \beta_1 \alpha (T_1^4 - T_0^4) \quad (2.10)$$

$\alpha$  Stefan sabiti (  $5.67 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) ve  $\beta_1$  yüzeylerin salınımı tanımlayan ve birden küçük değeri olan bir sabittir. Bir köpüğün termal iletkenliğine radyasyonel katkısı, artan hücre büyüklüğü ile artmakta ve artan yoğunluk ile azalmaktadır (Gibson vd. 2014).

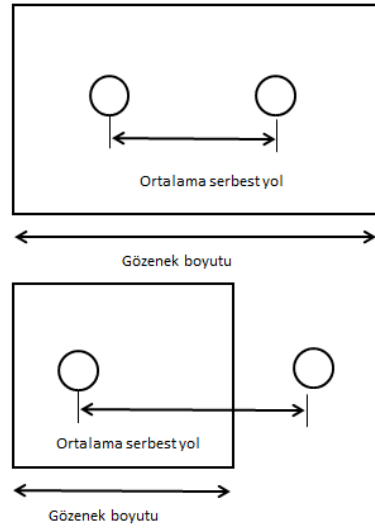
Gözenekli yapı malzemelerindeki ısı transferini açıklamak düzensiz mikro yapıları nedeniyle karmaşık bir durumdur. Katı matris ve boşluklar içerisindeki ısı iletimini ölçmek ve tanımlamak oldukça zordur (Buonanno ve Carotenuto 1997, Özgümüş vd. 2011, Trautz 2015). Köpük malzemelerde ısı, iletim mekanizması ile katı fazın içerisine ilerlemesi yoluyla, sıvı faz yardımıyla ve iletim mekanizmasıyla, katı partiküller ile konveksiyon mekanizmasıyla ve sıvı faz ile konveksiyon mekanizmasıyla sağlanmaktadır. Kompleks ısı iletimindeki bileşenler aşağıda verilmiştir (Davies 2006, Luikov 1964, Prakouras vd. 1978).

- Katı matris / partiküllerde ısı iletimi,
- Gözenek sıvısı yoluyla ısı iletimi (hava veya su),
- Parçacıklar arasında bulunan mikro boşluklarda ısı iletimi,
- Parçacık temaslı ısı iletimi,
- Gözenek sıvısı yoluyla ısı transferi,
- Gözeneklerin katı yüzeylerinden radyasyon (gözeneklerde partikül radyasyonu)

Isı iletkenliği, tüm ısı transferi hesaplamalarında rol oynayan önemli bir özelliktir ve ısının malzemeden geçme hızını yönetmektedir. Gözenekli bir yapı malzemesindeki ısı iletkenlik değerinin hesaplanmasını göz önüne alındığında; gözeneklilik, katı matrisin iletkenlik değeri, gözenek içindeki akışkanın cinsi (su ya da hava) ısı iletkenliği etkileyen en temel faktörlerdir. Aynı zamanda gözeneklilik miktarı, gözenek boyutu, dağılımı ve türü gözenekli yapı malzemelerindeki ısı transferini etkilemektedir (Sugawara ve Yoshizawa 1961).

Bir malzemedeki ısı iletkenlik değerini dūřürmenin yani yalıtım özelliğini geliştirmenin en iyi yolu gaz halindeki termal iletkenliğin azaltılmasıdır. Gaz halindeki termal iletkenlikte ( $\lambda_g$ ) en etkili azalmayı sağlamak için, mükemmel bir vakum uygulanmalıdır. Baetens vd. gözenekli bir malzemenin düşük basınçta gaz halindeki termal iletkenliğinin gaz moleküllerinin sayısı ve sıcaktan soğuğa giderken gaz için engellerin sayısı ile belirlendiğini ifade etmektedir (Baetens vd. 2010).

Gaz halindeki termal iletkenliğin azaltılması iki şekilde sağlanabilir. Bunlardan ilki gözenek içindeki basıncın azaltılmasıyla (mükemmel vakum ortamıyla) gerçekleştirilebilir. Böylece belirli bir alan içinde daha az parçacık bulunur ve parçacıklar arasındaki serbest yol artar. Bir diğer yöntem ise nano boyutlarda gözenekli bir yalıtım plakası üretmektir. Malzemenin gözenek çapı, gaz moleküllerinin yolunun ortalama serbest uzunluğundan daha az olduğunda, moleküller Knudsen Etkisi (Şekil 2.15) olarak bilinen etki sayesinde enerji aktarılamadan fonon-gözenek yüzeyi çarpışmasıyla azalmakta ve ısı iletkenliği azaltmaktadır. Fakat mükemmel bir vakuma yakın koşullara ulaşmak, bu koşulları sürdürmek, üretim karmaşıklığı nedeniyle bina yalıtım uygulamaları için kullanmak ve ürünü ticarileştirilmek pek de mümkün değildir. Bu sebeple mikro ve nano boyutlu gözeneklere sahip bir malzeme üretimini sağlamak daha avantajlı olacaktır (Shatat vd. 2015). Bu tez çalışmasının bir bölümünde, hazırlanan köpük numunelerdeki gözenek boyutlarının termal iletkenlik üzerine etkisi incelenmiştir.



$Kn < 1$  ortalama serbest yol hücre boyutlarından daha küçük

$Kn > 1$  ortalama serbest yol hücre boyutlarından daha büyük. Gaz halindeki termal iletkenlik ( $\lambda_g$ ) daha düşük.

**Şekil 2.15** Gaz halindeki termal iletkenlik üzerinde Knudsen etkisi.

## 2.6 Deney Tasarımı

Son yıllarda deney tasarımı yöntemleri deney sayısını azaltma, daha az laboratuvar çalışması ile daha çok bilgi elde etme, zaman ve hammaddeden tasarruf, faktörlerin birbiriyle olan ilişkisini daha detaylı inceleyebilme gibi sebeplerden dolayı ön plana çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, faktör etkilerinin istatistiksel öneminin uygunluğun değerlendirilmesine izin veren matematiksel modellerin geliştirilmesine de izin vermektedir. Tek değişken seçerek tasarlanan deney ile çok değişkenin aynı anda hesaba katıldığı deney tasarımlarında sonuçlar farklı olabilmektedir. Bu sebeple tek faktör kullanılarak hazırlanan deney tasarımı, diğer değişkenlerin seviyesine göre değişiklik gösterdiğinden dolayı optimum değerleri bulmak zorlu olabilir. Bu sebeple birçok faktörün aynı anda değiştiği çok değişkenli deney tasarımları gün geçtikçe popülerleşmektedir. Deney tasarımına başlarken atılacak ilk adım, deney sonuçlarını en çok etkilediği düşünülen faktörlerin ortaya çıkarılmasıdır. En önemli faktörler belirlendikten sonra Box Bhenken tasarımı (BBT), Doehlert matriksi (DM), merkezi kompozit tasarımlar (MKT) gibi deneysel tasarımlar kullanılarak optimum değerlere ulaşılmaktadır (Addelman vd. 1979).

Deney tasarımı; bir ürünün ya da sürecin performansını geliştirmek ve iyileştirmek amacıyla, süreci etkilediği düşünülen faktörler üzerinde çalışmalar yapılarak ürün özelliklerinin ve performansının değiştirilmesi, gözlemlenmesi ve yorumlanmasıdır. Deney tasarımı süreç geliştirmede, mevcut ürünün özelliklerini ve performansını iyileştirmede önemli rol

oynamaktadır (Montgomery 1991). Montgomery nin kullanmış olduğu yöntem esas olarak;

1. Temel tasarım konfigürasyonlarının geliştirilmesinde ve alternatif konfigürasyonların karşılaştırılmasında,
2. Malzeme alternatiflerinin seçiminde,
3. Sağlam bir ürün elde edebilmek için tasarım parametrelerinin belirlenmesinde
4. Ürün performansını etkileyen en temel tasarım parametrelerinin belirtilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

İstatistiksel deney tasarım yöntemi ile elde edilen verilerin güvenilirliği, deney sürecinde toplanan verilerin doğru analizine bağlıdır. Doğru analiz edebilmek de temel olarak rassallık tekrarlama ve bloklamaya dayanmaktadır. Deneylerin tekrarlanması ile elde edilen sonuçlar deneylerin doğruluk payını arttırmaktadır. Deneyleri dışarıdan etkileyen başka faktörlerin bulunması (makine-teçhizat vs) deneylerin doğruluğunu etkileyebileceğinden dolayı numunelerin rassal olarak seçilmesi elde edilen verilerin birbirinden bağımsız olmasını sağlamaktadır. Cihaz-teçhizatı kullanan farklı operatörlerden elde edilen çıktıların kendi içinde değerlendirilmesi de bloklama olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde çıktılara etki eden faktörler bloklama değişkeni olarak ele alındığında operatörler arasındaki farklılıkların deney sonucuna olan etkisi azalmış olacaktır (Montgomery 1991).

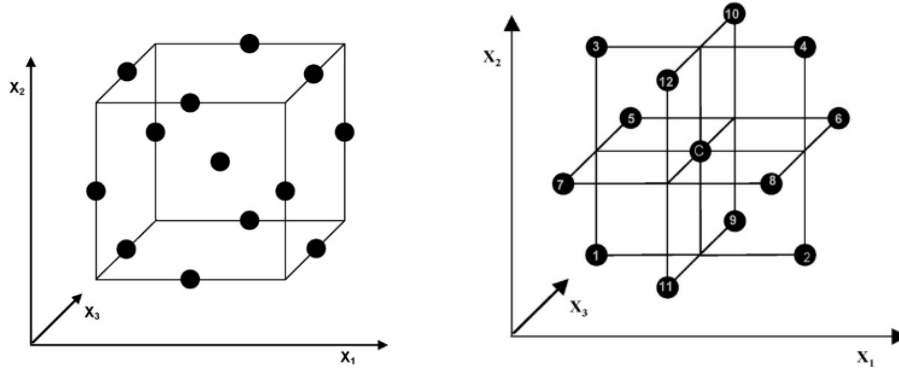
Çoklu değişken optimizasyon prosedürü sırasında faktörler ve tepkiler olmak üzere iki farklı değişken vardır. Tepkiler bağımlı değişken olmakla birlikte değerleri, nitel veya nicel olarak sınıflandırılabilir faktörlerin seviyelerine bağlıdır. Tepkiler ve faktörler arasındaki ilişki analiz edildiğinde ise faktörlerin optimal değerleri belirlenebilmektedir (Montgomery 1991).

Deneysel tasarım yöntemi; iki veya daha fazla değişkenin çıktı üzerindeki etkisini hem doğrudan etkileyen hem de başka faktörün etkisine bağlı olarak tüm kombinasyonlar için inceleyen ve oluşabilecek tüm etkiler en etkili şekilde ortaya koyan bir tasarım modelidir (Montgomery 1991).

Deneysel tasarım yöntemi kullanılmadan deney yapıldığında, sonucu etkilediği düşünülen ilk faktör üzerinde değişiklikler yapılarak en iyi değerlere ulaşana kadar ilk faktör üzerinden gidilir. İkinci faktör için en iyi değerlere ulaşılmaya çalışıldığında bu kez ilk faktör için

optimum değerden uzaklaşmış olunacaktır. Faktör seviyelerinde yapılan her değişiklik de kişiyi tüm seviyelerde değişiklik yapmaya yöneltecektir. Bu sayede her faktörün etki seviyesi ayrı ayrı anlaşılmış olsa da, süreci tam anlamıyla anlayabilmek mümkün olmayacak, faktörlerin birbirleriyle olan etkileri çözülemeyecektir. Deneysel tasarım yönteminin kullanıldığı çalışmalarda bir faktörün etkisi diğer faktörlerin farklı derecelerindeki etkisi incelenebilecek, daha az deney ile daha çok veri elde edilecektir (Montgomery 1991).

Box Behnken tasarımlarında işlem kombinasyonları, işlem alanının kenarlarının orta noktalarında ve merkezindedir. Üç faktörlü tasarımlar için grafiksel gösterim Şekil 2.16.da sunulmuştur.



**Şekil 2.16** a) BBT küpü ve birbirine kenetlenen üç adet 22 faktoriyel tasarımı b) Birbirine bağlı üç adet 22 faktoriyel tasarım ve merkezi nokta.

BBT'nin avantajı, tüm faktörlerin aynı anda en yüksek veya en düşük seviyelerinde olduğu kombinasyonları içermemesidir. Bu nedenle, bu tasarımlar tatmin edici olmayan sonuçların ortaya çıkabileceği zor koşullar altında yapılan deneylerden kaçınmak için kullanışlıdır (Addelman vd. 1979).

Geopolimer konu başlığında da farklı deney tasarımı yöntemlerini kullanarak bulgular elde eden araştırmacı bulunmaktadır. Çalışmalarında genellikle su/bağlayıcı oranı, uçucu kül/alkali oranı, molarite, hammadde oranı gibi kritik parametreler üzerine durmuşlardır. Li vd. Taguchi metodunu kullanarak cüruf esaslı beton konusunda çalışmalar yapmıştır (Li vd. 2018). Hadi vd. geopolimer esaslı betonler konusunda çoklu regresyon modelini kullanarak mukavemet, kıvam, set olma süresi ile ilgili dört faktör kullanarak çalışmalar yapmışlardır

ve alkali/bağlayıcı, sodyum silikat/sodyum hidroksit, su/bağlayıcı oranlarını içeren formülasyonlar geliştirmişlerdir (Hadi vd. 2019). Lokuge vd. çok değişkenli adaptif regresyon spline modeli kullanarak uçucu kül-geopolimer beton konusunda çalışma yapmışlardır. Çalışmaları esnasında konu ile ilgili şimdiye kadar yapılan tüm literatür bilgilerini toplayarak su/bağlayıcı, alkali/bağlayıcı, sodyum silikat/sodyum hidroksit, molarite faktörlerini analiz etmişlerdir (Lokuge vd. 2018). Onoue vd. Taguchi metodunu kullanarak uçucu kül esaslı geopolimerler ile ilgili deney tasarımı yapmışlardır. Farklı lotlardan alınan iki farklı uçucu kül ile ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı, molarite, uçucu kül-cüruf oranı, karıştırma süresi, kütleme sıcaklığı, kümülatif sıcaklık konularını çalışmışlardır (Onoue vd. 2019).

Bu tez çalışmasında ise Box Behnken metodu kullanılarak; uçucu kül-metakaolen oranı, molarite, kütleme sıcaklığı, sürfaktan miktarı, hidrojen peroksit miktarı, perlit miktarı olmak üzere altı farklı faktör üzerinde durulmuştur. Minitab19 programı kullanılarak kompozisyonlar hazırlanmıştır.

## **2.7. İstatistiksel Analizler**

Çalışmada elde edilen bulgular, istatistiksel açıdan değerlendirilmiştir. Tüm analizlerde güven aralığı %95,  $\alpha=0,05$  olarak alınmıştır. Uygulanan istatistiksel analizler açıklanmış ve çalışmada kullanılan değişkenlerle ilişkilendirilmiştir.

### **2.7.1 Regresyon Analizi ve Çok Değişkenli Regresyon**

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler (estimation) ya da kestirimler (prediction) yapabilmek amacıyla yapılmaktadır. Tahmin değişkeni olarak bir değişken kullanılırsa basit regresyon, tahmin değişkenleri olarak iki veya daha fazla değişken kullanılırsa çoklu regresyon analizinden söz etmek mümkündür. Amaç her tahmin değişkenininin kriter değişkenindeki toplam değişmeye olan katkısının saptanması ve dolayısıyla tahmin değişkenlerinin doğrusal kombinasyonunun değerinden hareketle kriter değerinin tahmin edilmesidir.



Bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişkenin yer aldığı regresyon modelleri çok değişkenli regresyon analizi olarak tanımlanmaktadır. Çok değişkenli regresyon analizinde bağımsız değişkenler aynı anda bağımlı değişkendeki değişimi açıklamaya çalışmaktadır. Çoklu regresyon katsayısı R, bir bağımlı değişkendeki değişim ile eşzamanlı ele alınan birden fazla bağımsız değişkendeki değişim arasındaki ilişkinin derecesini göstermektedir. Çoklu regresyonda hangi bağımsız değişkenin daha önemli olduğunu ve bağımlı değişkeni daha çok etkilediğini ölçmek mümkündür. Yüksek korelasyon, daha güçlü doğrusal ilişkiyi göstermektedir. Korelasyon da belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) ile tanımlanmaktadır. Bu sayı, bağımlı değişkenin yüzde kaçının modele dahil edilen bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını göstermektedir. Modele girecek değişkenlerin seçimi Enter metodu, Forward Selection, Backward Selection ve Stepwise Selection gibi değişken ekleme işlemleri ile yapılmaktadır.

Enter metodunda, bağımsız değişkenler bir blok olarak tek adımda girilip değerlendirilmektedir. Forward Selection ile bağımlı değişkenle olan korelasyon güçlerine göre modele sıraya sokulur. Modele giren herbir değişkenin etkisi ölçülür ve önemli derecede etkilemeyenler modelden çıkarılır. Backward Selection'da tüm değişkenler modele dahil edilerek en güçsüz bağımsız değişken modelden çıkarılır ve regresyon tekrar hesaplanır. Stepwise Selection'da ise her değişken modele sırayla eklenir ve model değerlendirilir. Eğer eklenen değişken katkı sağlıyorsa kalır sağlamıyorsa çıkarılır (Büyüköztürk, 2020).

### **2.7.2. Basit ve Kısmi Korelasyon**

Korelasyon, iki değişken arasındaki ilişkinin kuvveti ve yönünü n matematiksel olarak ifade edilmesidir. Korelasyon analizinde amaç; bağımsız değişken (X) değiştiğinde, bağımlı değişkenin (Y) ne yönde değişeceğini görmektir. Korelasyon katsayısı küçük r ile gösterilmekle birlikte -1.00 ile +1.00 arasında değerler almaktadır. Değerlerin 1.00'e yaklaşması mükemmel ilişkiye, 0'a yaklaşması ilişkinin yokluğuna yaklaştığını göstermektedir. Korelasyon katsayısının mutlak değer olarak 1.00 olması mükemmel; 1.00-0.70 güçlü; 0.70-0.30 arasında olması, orta; 0.30-0.00 arasında olması ise düşük düzeyde bir ilişki olarak tanımlanmaktadır. Korelasyon katsayısının işareti pozitifse, değişkenlerden birinin değeri artarken (azalırken) diğerinin de arttığını (azaldığını) gösterir. Korelasyon katsayısının işareti negatifse, değişkenlerden birinin değeri artarken (azalırken) diğerinin

değerinin azaldığını (arttığını) gösterir. Yani ters yönlü bir ilişki söz konusudur.

Korelasyon katsayısı değerlendirilirken hesaba giren veri sayısı (n) önemlidir. Tesadüfi sebeplerin tesiri daha iyi giderileceği için veri sayısı çoğaldıkça ulaşılabilecek sonuca daha çok güvenilebilir. Çok fazla gözleme dayanan değerlendirmelerde 0.25'e kadar düşmüş bir korelasyon katsayısı bile anlamlı sayılabilmektedir. Fakat az sayıda (10–15) gözleme dayanan değerlendirmelerde korelasyon katsayısının 0.71'den büyük olması beklenir. Değişkenlerden birinde gözlenen değişkenliğin ne kadarının diğer değişken tarafından açıklandığını yorumlamada kullanılır ve korelasyon sayısının karesine eşittir.

Çok sayıda korelasyon analizi mevcut olmasına rağmen en sık kullanılan analizler Pearson ve Spearman'dır. Değişkenler oransal ya da aralıklı ölçek ile elde edilmiş ve normal dağılıma uygunluk gösteriyorsa bu durumda Pearson korelasyon analizi yapılır. Değişkenler oransal ya da aralıklı ölçek ile elde edilmiş ancak normal dağılıma uygunluk göstermiyorsa Spearman korelasyon analizi yapılmaktadır. Değişkenler sıralı ölçekle elde edilmiş ise bu durumda da Spearman korelasyon analizi uygulanması mümkündür.

Korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki ilişkiyi gösterirken, diğer değişkenlerin etkilerini dikkate almamaktadır. Ancak, bazen geriye kalan değişkenlerin etkisi ortadan kaldırıldıktan sonra, iki değişken arasındaki ilişkinin miktarı incelenmek istenebilir. Diğer bir deyişle, ikincil ilişkilerin etkisi ortadan kaldırıldıktan sonra iki değişken arasındaki gerçek ilişki incelenmek istenebilir. Bu inceleme kısmi korelasyon katsayıları yardımı ile yapılmaktadır. Kısmi korelasyonda incelenen değişkenlerle ilişkili olduğu düşünülen bir ve ya daha fazla değişkenin bu değişkenler üzerindeki etkisi kontrol altında tutulur. Kısmi korelasyonun hesaplanması için;

- Aralarında ilişkinin miktarı bulunacak değişkenlerin ve bu değişkenlerdeki varyanslarının sabitleneceği,
- Kontrol edileceği dışsal değişkenlerin sürekli olması ve
- Değişkenlerin normal dağılım göstermesi gerekmektedir (Büyüköztürk 2020).

Basit Korelasyon; değişkenler arasındaki ilişkinin incelenmesine, değişkenlerin ölçme yapısına, dağılımın özelliklerine, aralarındaki ilişkinin doğrusal olup olmamasına, değişken sayısına ve kontrol durumuna bağlı olarak farklı istatistiksel teknikler kullanılarak yapılmaktadır.

İki değişken arasındaki ilişki, ikili yada basit korelasyon ismi verilen korelasyon teknikleri ile bulunur. Bir değişkenin iki yada daha çok değişken ile olan ilişkisi çoklu korelasyonun, bu değişkenlerden birinin kontrol edilerek diğer değişkenlerle olan ilişkisi ise kısmi korelasyon tekniklerinin konusudur.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Hammaddeler

##### 3.1.1 Alüminosilikat İçerikli Hammaddeler

Bu tezde Seyitömer Termik santralinden alınan düşük kalsiyum içerikli F tipi uçucu kül, Çekya'dan temin edilen MEFISTO L05 metakaolen (metakaolen dönüşüm sıcaklığı 750°C) ve Kardemir'den temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu hammaddeleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan hammaddelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1'de ve XRD sonuçları Şekil 3.1'de verilmiştir.

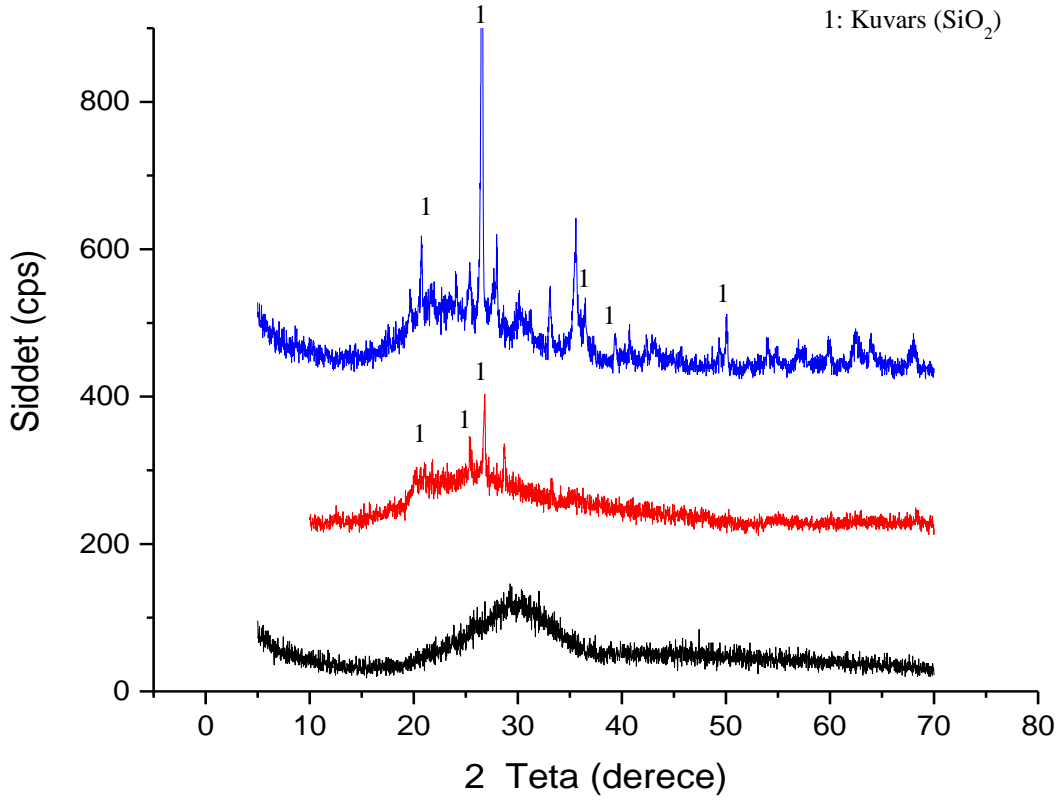
Metakaolen, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül numunelerinin piknometre yardımıyla ölçülen yoğunluk değerleri, tane boyutları ve BET analizi ile ölçülen yüzey alanlarına ilişkin bilgiler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Kullanılan hammaddelerde yüzey alanı en yüksek olan hammadde metakaolendir. Tane boyutu en büyük olan malzeme öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufudur. Metakaolen ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun yoğunluk değerleri yaklaşık aynı iken öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun yoğunluğu bir miktar daha yüksek değerdedir.

Çizelge 3.1 Hammaddelerin kimyasal kompozisyonları.

Hammaddeler (%)			
Bileşenler	Metakaolen	Uçucu Kül	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
MgO	0.15	4.67	2.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.32	19.10	10.78
SiO <sub>2</sub>	51.49	50.30	35.46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.13	0.007
SO <sub>3</sub>	0.13	1.80	1.47
K <sub>2</sub> O	0.53	2.16	1.01
CaO	0.16	4.55	40.57
TiO <sub>2</sub>	1.65	0.81	2.26
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.05	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16	12.40	0.96

Çizelge 3.2 Hammaddelerin yoğunluk ve yüzey alanı ölçümleri.

Hammaddeler	Tane Boyutu(µm)	Özgül Yüzey(m <sup>2</sup> /g)	Özgül Ağırlık(g/cm <sup>3</sup> )
Uçucu Kül	29.97	7.91	2.58
Metakaolen	3.0	17.08	2.5
Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	15.63	0.93	2.88



Şekil 3.1 Hammaddelerin XRD sonuçları mavi= uçucu kül, kırmızı= metakaolen, siyah=yüksek fırın cürufu.

Alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan hammaddeler amorf yapıda olmakla birlikte uçucu kül ve metakaolen kalıntı kuvars içermekte ve kuvars içeriğine bağlı pikler gözlenmektedir.

### 3.1.2 Sodyum Silikat

Sodyum silikat su camı olarak da bilinmektedir. Bu malzeme piyasada hem katı hem de sıvı halde bulunmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında sıvı haldeki sodyum silikat kullanılmıştır. Geopolimer bileşim tasarım çalışmalarında katı hammaddelerin yanı sıra alkali ortam oluşturan sodyum silikattan gelen  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarları da önem taşımaktadır. Bu sebepten kullanılacak olan sodyum silikatın da kimyasal kompozisyonu bilinmelidir. Kimyasal kompozisyonun bulunması için 100g sodyum silikat  $100^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuş ve su içeriği kütlece %45 olarak ölçülmüştür. Kuruyan sodyum silikat havanda öğütülmüş ve kimyasal analizi yapılmıştır. Kimyasal analize ait sonuçlar Çizelge 3.3'de sunulmuştur. Çalışmada 3 modül sodyum silikat kullanılmıştır.

**Çizelge 3.3** Sodyum silikatın kimyasal analizi.

Bileşen	Kütle (%)
Na <sub>2</sub> O	35.47
SiO <sub>2</sub>	64.10
K <sub>2</sub> O	0.25
CaO	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16

### 3.1.3 Sodyum Hidroksit

Kostik soda olarak da bilinen sodyum hidroksit (NaOH) inorganik bir bileşiktir. Beyaz renkli, kostik özelliklere sahip bir alkali tuzdur. Su içerisine çözünme reaksiyonu ekzotermik bir reaksiyon olup, yüksek miktarda ısı açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Oluşan çözelti renksiz ve kokusuzdur. Bu çalışmada pul şeklinde NaOH kullanılarak 6M, 8M ve 10M’lık çözeltiler hazırlanılmıştır.

### 3.1.4 Genleştirilmiş Perlit

Perlit, ısıyla genleşme özelliği olan, genleştirildiğinde çok hafif ve gözenekli hale geçen volkanik bir kayadır. Perlitin özgül ağırlığı 2.2 – 2.4 kg/m<sup>3</sup> tür. Isıtıldığında, 840-1100°C arasında yumuşar ve 1315-1330°C arasında erir. Perlit belirli tane iriliğinde özel şartlarda 900-1150°C arasında ısıtıldığında hacmi 24 katına kadar artmakta ve yoğunluğu 50 kg/m<sup>3</sup> e kadar düşmektedir. Perlitin ısı iletkenliği 32 kg/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığında 0.04 W/mK, 180 kg/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığında ise 0.055 W/mK olmaktadır. A sınıfı yanmaz malzeme sınıfındadır. Perlit yapı sektöründe ısı yalıtımı amacıyla sıva içerisinde agrega olarak, paketler hâlinde yalıtım şiltesi olarak ya da levhalar hâlinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada 1-3mm boyut aralığında genleştirilmiş perlit kullanılmıştır.

### 3.1.5 Polipropilen Fiber

Betonda kalıcılığı (durabiliteyi) arttırmak için kullanılan, kimyasallara ve yüksek ısıya karşı dayanıklı, hidrofobik özelliğe sahip, her tip çimento ile uyumlu, oluşacak kuruma büzülmesi

çatlaklarını en aza indirgeyen, polipropilenden mamul liflerdir. Beyaz renklidir. Bu çalışmada 1cm uzunlukta ve 30µm çaplı kırılmış polipropilen fiber kullanılmıştır.

### **3.1.6 Hidrojen Peroksit**

Hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) soluk mavi renkte; sulandırıldığında ise renksiz hale gelen bir bileşiktir. Genellikle dezenfektan, ağartma, leke giderme gibi amaçlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise hücresel yapı elde etme amacıyla köpürtücü ajan olarak kullanılmıştır. Geopolimer köpüğün yoğunluk değerleri hidrojen peroksit sayesinde düşürülmüş, ısı yalıtımı özellikleri iyileştirilmiştir.

### **3.1.7 Kalsiyum Stearat**

Kalsiyum stearat ( $CaSt_2$ ), stearik asit ve kirecin reaksiyonundan elde edilen karboksilat grubu bir bileşiktir. Bu uzun zincir metal iyonlarının karboksilatları (Serdar vd. 2010, Turcinskas vd. 2018) kalsiyum sabunu olarak da bilinmektedir. Toksik bir özelliği bulunmamakla birlikte yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Suya karşı dayanıklıdır ve yapı sektöründe su itici ajan olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada MELOS'un kalsiyum stearat hammaddesi su itici özelliği dolayısıyla sürfaktan olarak kullanılmıştır.

### **3.1.8 Süperplastikleştirici**

Süperplastikleştiriciler (su azaltıcılar) genellikle beton veya harçta işlenebilirliği, reolojii ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan süperplastikleştiriciler arasında lignosülfonatlar, naftalen, melamin esaslı bileşikler ve modifiye polikarboksilatlar bulunmaktadır (Luukkonen vd. 2018). Bu çalışmada tüm numunelerde eşit oranda bulunacak şekilde Master Glenium51 (polikarboksilik esaslı süperakışkanlaştırıcı) kullanılmıştır.

## **3.2 Numune Üretim Sürecine Hazırlık Çalışmaları**

DeneySEL çalışmalarının başında uçucu kül esaslı geopolimer karışımlarının yanında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun da kullanılması hedeflenmişti. Ancak geopolimer köpük karışımlarının hazırlanması esnasında karşılaşılan numune tabanının ayrışması,

gözenek oluşumunun kontrolünde zorluk gibi nedenlerden dolayı öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu deney tasarımına eklenmeden çalışmalara devam edilmiştir. Her ne kadar literatürde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun geopolimerleşmeyi iyileştirdiği ile ilgili bilgiler verilip çalışmalar yapılsa da köpük çalışmasında, köpüklerin kontrol altına alınmasının ve kararlı köpüklerin oluşturulmasının zorlukları gözlemlenmiştir. Ön çalışmalarda elde edilen başarılı bulgular hammadde ve katkı oranlarının değiştirilmesi ile de kontrolden çıkmış beklenen sonuçlar elde edilememiştir. Ön çalışmalarda göstermiş olduğu avantajın sürdürülemediği kanaatine varılmış ekonomik faktörler de göz önünde bulundurularak hammadde değişikliğine gidilmiştir. Bu sebeple deneysel çalışmalara öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu olmadan devam edilmiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren geopolimer karışımlarına örnek çalışma reçetesi Çizelge 3.4’de ve yaşanan problemlere ilişkin görüntüler Şekil 3.2’de sunulmuştur. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren numunelerde tabanda yoğun bir katman yüzeye doğru köpük oluşumu gözlemlenmiştir. Karışımdaki cüruf miktarı arttıkça ayrışan taban kalınlığı artmıştır. Bunun sebebi öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun yüzey alanının (yani tane boyutunun) uçucu küle göre 8.5 kat daha büyük olması ve yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır (Çizelge 3.2). Bu sebeple ağır olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu köpük oluşumu sırasında stabilitesini koruyamamakta ve dibe doğru çökmektedir ve bu sebeple köpük numunelerde segregasyon meydana gelmektedir.

**Çizelge 3.4** Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren kompozisyonlar.

<b>Hammaddeler</b>	<b>%</b>
<b>Uçucu Kül</b>	50-100
<b>Yüksek Fırın Cürufu</b>	0-50
<b>Toplam</b>	100
<b>Katkılar</b>	<b>Ana</b>
	<b>Kompozisyona</b>
	<b>Göre %</b>
<b>Kalsiyum stearat</b>	0.75
<b>Sodyum Silikat</b>	50
<b>6 M NaOH</b>	63
<b>Polipropilen Fiber</b>	0.2
<b>Perlit (patlatılmış)</b>	0-2.5
<b>Akışkanlaştırıcı</b>	5.5
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	0.85
<b>Bulk yoğunluk kg/m<sup>3</sup></b>	620-710





**Şekil 3.2** Yüksek fırın cürufu içeren numunelerde yaşanan sorunlar a) Gözenek oluşumunun kontrol edilememesi b) Numunelerde görülen taban ayrışması.

Buna ek olarak ise aynı şartlarda etüvde kürlenmiş ve 14 gün süreyle oda sıcaklığında bekletilen numuneler fiziksel olarak incelendiğinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren numunenin (sağdaki) bombeleştiği ve yüzeyinde çiçeklenme olarak adlandırılan beyaz tortuların uçucu kül esaslı karışımlara göre daha fazla görüldüğü gözlemlenmiştir (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3** Uçucu kül esaslı, metakaolen (solda) ve yüksek fırın cürufu (sağda) içeren numunelerin rötre için hazırlanan prizmatik numuneleri.

Deneysel çalışmalara termik santral atığı olan uçucu kül ile devam edilmiştir. %100 oranda uçucu kül ile yapılan çalışmalarda da numune yüzeylerinde çökme ve çatlama problemi gözlemlenmiştir (Şekil 3.4). Bu sebeple ekonomik koşullar göz önünde bulundurularak düşük miktarlarda çalışmak kaydıyla daha problemsiz olduğu ve geopolimerleşme kabiliyetinin iyi

olduğu bilinen metakaolen hammaddesi ile deneysel çalışmalara devam edilmiştir.



**Şekil 3.4** Tamamen uçucu kül ile hazırlanan numunelerde gözlemlenen çökme ve çatlama problemleri.

Deneysel çalışmaların hazırlık aşamasında yapılan ön çalışmalar dâhilinde hammaddelerin yaklaşık kullanılabilir değerleri ve alkali karışımın molarite değerleri hem literatür bilgilerinden yararlanarak hem de ön deneysel elde edilen bulgulara dayanarak deney tasarımı planlanmıştır.

Çalışmanın devamında deneysel tasarım programı kullanılarak deneyler sürdürülmüştür. Deney tasarımı için altı faktör (değişken) için deney tasarımı hazırlanmıştır. Deney tasarımında değişkenler için maksimum (1) ve minimum (-1) değerler belirlenmiştir. Maksimum ve minimum değerler yapılan ön çalışmalardan yola çıkılarak belirlenmiştir. Ortalama değerler (0) program tarafından verilmiştir. Deney tasarımı için belirlenen değerler Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Çizelgede verilen içeriklere ek olarak tüm numunelerde eşit miktarda olacak şekilde şüperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu aşamanın sonucunda altı adet faktör ve bu faktörlerin üç farklı seviyede değerlendirilmesi için toplamda 54 farklı reçete tasarlanmıştır. Program tarafından hazırlanan reçete Çizelge 3.6'da sunulmuştur. Belirtilen deney tasarımı için numuneler hazırlanmış ve her bir numunenin yoğunluk, mukavemet, kuruma büzülmesi değerleri ölçülmüştür. Köpürtücü miktarı ve kürleme sıcaklığı değişkenleri göz ardı edilerek hazırlanan geopolimer çamurlarının reolojik özellikleri FordCup ve yayılma konisi (mini yayılma deneyi) ile incelenmiştir. Numunelerin ısı iletkenlik değer ölçümleri ise hazırlanan numunelerin arasından yeterli sayıda örnek seçilerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan

analizleri yorumlanmasında Minitab19 programı kullanılmıştır. Veriler SPSS programı ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

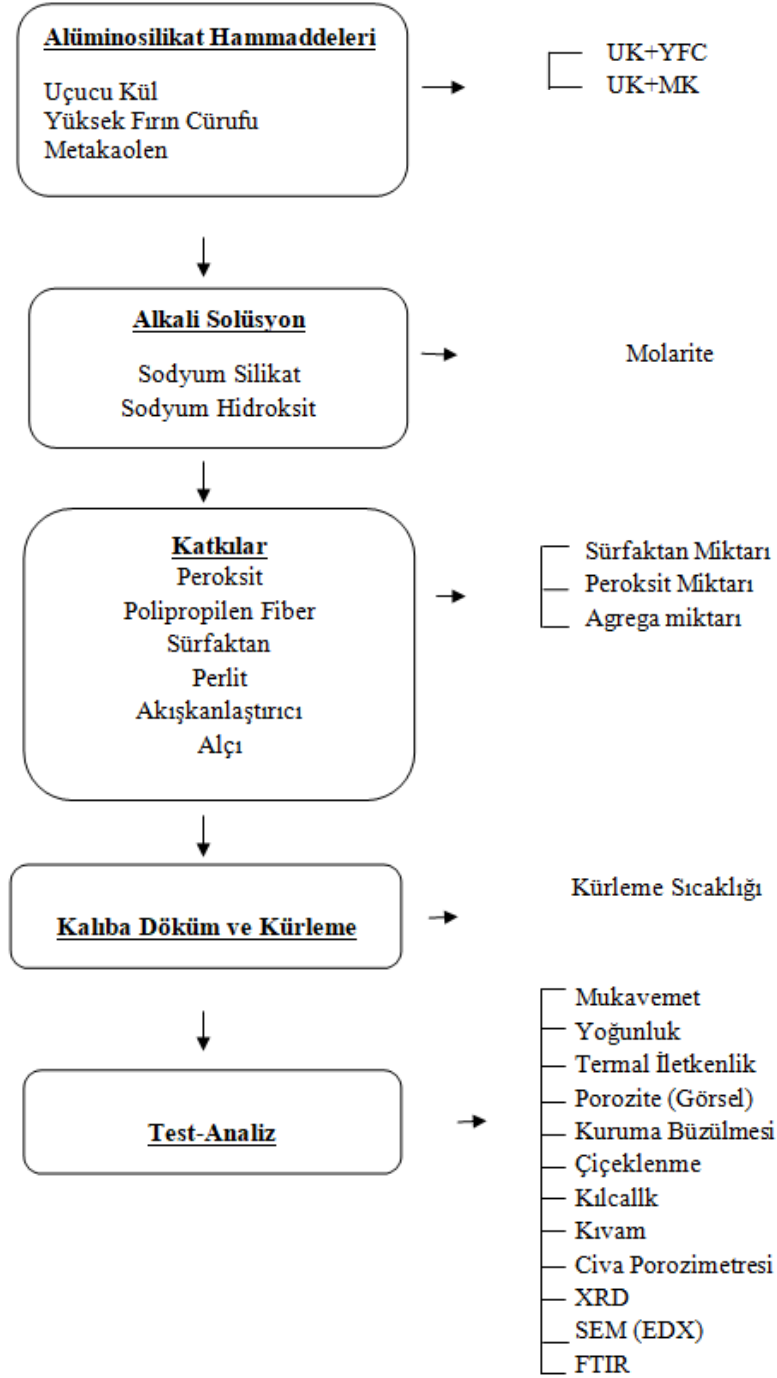
**Çizelge 3.5** Deney tasarımında kullanılan maksimum ve minimum değerler.

	-1	0	1
<b>Molarite (M)</b>	6	8	10
<b>Uçucu Kül-Metakaolen oranı (%)</b>	85-15	90-10	95-5
<b>Kalsiyum Stearat Miktarı (%)</b>	0.15	0.45	0.75
<b>Perlit miktarı (%)</b>	0	2.75	5.5
<b>Kürleme Sıcaklığı (°C)</b>	60	70	80
<b>Hidrojen Peroksit Miktarı (%)</b>	1	1.5	2

Deneysel çalışmalarda izlenen basamaklar Şekil 3.5’de verilmiştir. İlk adımda reçetede belirlenen oranlarda alüminosilikat hammaddeleri tartılıp homojen olarak karıştırılmıştır. Sonrasında belirlenen molaritelerde alkali karışımlar hazırlamak için sodyum hidroksit parçaları sodyum silikat içerisinde çözdürülmüştür. Karışım içerisine eklenmesi planlanan miktarlarda perlit ve polipropilen fiberler de alkali karışım içerisine eklenmiştir. Hazırlanan alkali karışım katı hammaddelerin üzerine dökülerek 5 dk boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra köpürtücü ve kalsiyum stearat ilaveleri geopolimer çamurunun içerisine eklenerek ilave 1dk daha karıştırılmıştır. Karışım 100x100x100mm boyutlarındaki kalıplara dökülerek 24 saat boyunca etüvde kürlenmiştir. Kürlenmiş numunelerin yoğunluk, mukavemet, ısı iletkenlik, kuruma büzülmesi, kılcallık gibi özellikleri kürlenme işleminden sonra 28.günde test edilmiş ve gözeneklilikleri taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir.

**Çizelge 3.6** Minitab19 programı aracılığıyla hazırlanan reçete bilgileri.

<b>Deney</b>	<b>Molarite</b>	<b>UK Oranı (%)</b>	<b>Kalsiyum Stearat (%)</b>	<b>Perlit (%)</b>	<b>Sıcaklık (°C )</b>	<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Miktarı(%)</b>
<b>1</b>	6	85	0.45	0	70	1.5
<b>2</b>	10	85	0.45	0	70	1.5
<b>3</b>	6	95	0.45	0	70	1.5
<b>4</b>	10	95	0.45	0	70	1.5
<b>5</b>	6	85	0.45	5.5	70	1.5
<b>6</b>	10	85	0.45	5.5	70	1.5
<b>7</b>	6	95	0.45	5.5	70	1.5
<b>8</b>	10	95	0.45	5.5	70	1.5
<b>9</b>	8	85	0.15	2.75	60	1.5
<b>10</b>	8	95	0.15	2.75	60	1.5
<b>11</b>	8	85	0.75	2.75	60	1.5
<b>12</b>	8	95	0.75	2.75	60	1.5
<b>13</b>	8	85	0.15	2.75	80	1.5
<b>14</b>	8	95	0.15	2.75	80	1.5
<b>15</b>	8	85	0.75	2.75	80	1.5
<b>16</b>	8	95	0.75	2.75	80	1.5
<b>17</b>	8	90	0.15	0	70	1
<b>18</b>	8	90	0.75	0	70	1
<b>19</b>	8	90	0.15	5.5	70	1
<b>20</b>	8	90	0.75	5.5	70	1
<b>21</b>	8	90	0.15	0	70	2
<b>22</b>	8	90	0.75	0	70	2
<b>23</b>	8	90	0.15	5.5	70	2
<b>24</b>	8	90	0.75	5.5	70	2
<b>25</b>	6	90	0.45	0	60	1.5
<b>26</b>	10	90	0.45	0	60	1.5
<b>27</b>	6	90	0.45	5.5	60	1.5
<b>28</b>	10	90	0.45	5.5	60	1.5
<b>29</b>	6	90	0.45	0	80	1.5
<b>30</b>	10	90	0.45	0	80	1.5
<b>31</b>	6	90	0.45	5.5	80	1.5
<b>32</b>	10	90	0.45	5.5	80	1.5
<b>33</b>	8	85	0.45	2.75	60	1
<b>34</b>	8	95	0.45	2.75	60	1
<b>35</b>	8	85	0.45	2.75	80	1
<b>36</b>	8	95	0.45	2.75	80	1
<b>37</b>	8	85	0.45	2.75	60	2
<b>38</b>	8	95	0.45	2.75	60	2
<b>39</b>	8	85	0.45	2.75	80	2
<b>40</b>	8	95	0.45	2.75	80	2
<b>41</b>	6	90	0.15	2.75	70	1
<b>42</b>	10	90	0.15	2.75	70	1
<b>43</b>	6	90	0.75	2.75	70	1
<b>44</b>	10	90	0.75	2.75	70	1
<b>45</b>	6	90	0.15	2.75	70	2
<b>46</b>	10	90	0.15	2.75	70	2
<b>47</b>	6	90	0.75	2.75	70	2
<b>48</b>	10	90	0.75	2.75	70	2
<b>49-54</b>	8	90	0.45	2.75	70	1.5



Şekil 3.5 Deney planı.

Deneyisel çalışmalarda hazırlanan geopolimer çamurlarının karıştırma süreleri, hammaddelerin karışıma eklenme sıraları, kurlenme süreleri gibi kriterlere özel olarak dikkat edilmiş, tüm karışımların aynı şekilde hazırlanmasına herhangi bir değişiklik yapılmamasına ve insan faktörü sebebiyle yanlış sonuçların elde edilmesinin önüne geçilmesine gayret edilmiştir. Deneyisel çalışmalarda hazırlanan numune görüntüleri Şekil 3.6’da sunulmuştur.



Şekil 3.6 Laboratuvar çalışmaları sırasında hazırlanan numuneler.

### 3.3 Test ve Analizler

#### 3.3.1 Mukavemet

Geopolimer köpük numunelerin basınç dayanımı için 100x100x100mm boyutlarındaki küp numuneler hazırlanmıştır. 54 farklı reçetede hazırlanan geopolimer köpüklerin mukavemeti değerleri 20 ton basınç ve 2 ton eğilme kapasiteli dijital kontrollü beton basınç presinde kırılmak suretiyle belirlenmiş ve numuneler ASTM C132-1998'e göre test edilmiştir. Numunelerin mukavemet analizleri 28. günlerde ölçülmüştür. Yedinci günde ölçülen tüm değerlerin 1MPa’ın altında kalıyor olması sebebiyle ölçümler 28. günlerde 3 farklı numunenin mukavemet değerlerinin ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Numunelerin mukavemet değerleri Minitab19 programı aracılığı ile analiz edilmiş, reçete değişikliğinin mukavemet değerleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

### 3.3.2 Yoğunluk

Numunelerin bulk yoğunluğu değerleri ASTM C 373:78-2014'e göre aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır. Denklemde (3.1)  $\rho_{Bulk}$ ,  $M_{kuru}$  ve  $V$  sırasıyla; bulk yoğunluk, kuru ağırlık ve hacim değerlerini temsil etmektedir. Hesaplanan değerler Minitab19 programına girilerek grafik çizimleri gerçekleştirilmiş ve değişkenlerin etkileri incelenmiştir.

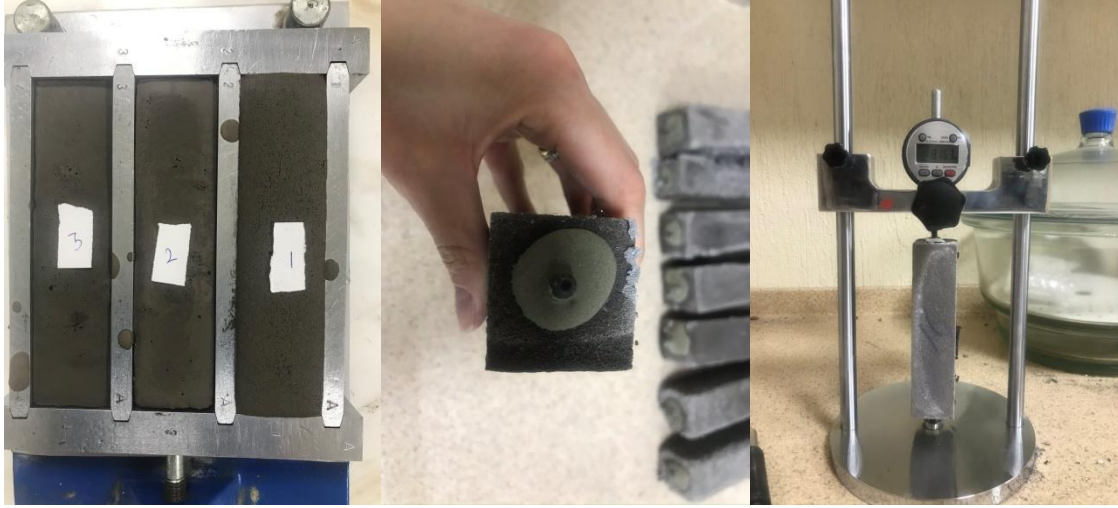
$$\rho_{Bulk} = \frac{M_{kuru}}{V} \quad (3.1)$$

### 3.3.3 Kuruma Büzülmesi

Numunelerin kuruma kuruma büzülmesi deneysel prosedürde açıklanan metodoloji kullanılarak hesaplanmıştır. Prizmatik numuneler (40mmx40mmx160mm) kalıplara dökülmüştür ve etüvde kürlenmişlerdir. Modifiye ASTM C157 prosedürü uygulanarak numuneler dökümden 3 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Erken yaş deformasyonları ve toplam boyut değişikliklerinin gözlemlenmesi amacıyla günlük olarak boyutları ölçülmüştür. Boyut ölçüm cihazı ile analiz için numunelerin her iki ucunda delikler açılmış ve vidalar gaz beton yapıştırıcı ile yerine sabitlenmiştir. Köpüklerin uzunluk farklılıklarını hesaplamak için, tüm numuneler bir dijital uzunluk komparatörüne yerleştirilerek boyutları kaydedilmiştir (Şekil 3.7). Kuruma büzülmesi değerlerini değerlendirmek için formülde boyutsuz bir  $L$  parametresi kullanılmıştır. Denklemde (3.2) verilen; boyut değişikliğini ve  $l_0$  ilk boyutu temsil etmektedir. Kuruma büzülmesi oranını değerlendirmek için prizmatik kirişlerin uzunluk değişimlerini ölçmenin yanı sıra, numunelerin kütle değişimi 24 saatte bir kaydedilmiştir.

$$L = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$





**Şekil 3.7** Prizma kuruma büzülmesi kalıpları b) Köpüklerin üzerine yerleştirilen vidalar c) Köpük geopolimerlerinin kuruma büzülmesini ölçmek için kullanılan cihaz..

### 3.3.4 Isıl İletkenlik

Numunelerin ısı iletkenlik değeri TA Instruments FOX 314 Isıl iletkenlik Analiz Cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler düşük iletkenlik özelliğe sahip inşaat ve izolasyon malzemelerinin (cam elyaf, taş yünü, vb.) ısı iletkenliğini ölçmede kullanılan sıcak levha yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemenin yüzeyi cihazın sensörü ile temas ettirilerek sensör ile numune arasındaki sıcaklık etkileşiminden malzemenin ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir. Isıl iletkenlik analiz cihazı ile malzemelerin ısı iletkenlik sabiti değerlerinin (k) W/mK cinsinden belirlenebilmektedir. Isıl iletkenlik ölçümleri 25°C’de gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenlik analizi için numuneler etüvde 105°C’de sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutulmuştur. Sıcak levha yöntemi için 300x300x50mm boyutlarında büyük numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3.8). Kuruyan numuneler bulunduğu ortamdan nem almaması için streç film ile sarılmış ve numuneler kutularak analiz yapılması amacıyla ölçüm laboratuvarına gönderilmiştir.





**Şekil 3.8** Sıcak levha yöntemi ile ısı iletkenlik analizi yapılmak üzere hazırlanan 30x30x5cm boyutlarındaki numuneler.

### 3.3.5 Çiçeklenme Analizi

Çiçeklenme problemi için literatürde belirlenmiş başka bir ölçüm yöntemi olmadığından, numuneler sadece görsel olarak analiz edilmiştir. Geopolimer numunelerde gerçekleşen çiçeklenme problemini gözlemlemek için, 28 gün boyunca oda sıcaklığında tutulan numuneler kullanılmış ve bünyelerinde barındırdıkları nemi tamamen uzaklaştırmak için 24 saat boyunca etüvde 105°C’de kurutulmuşlardır. Daha sonra numuneler bünyelerine giren su miktarının kolaylığını sağlamak amacıyla su ile dolu bir kabin içerisine ve bir ızgara üzerine yerleştirilmiştir. Örnekler üzerinde beyaz tuz birikintilerinin oluşması numunelerin düzenli aralıklarla fotoğraflanması ile analiz edilmiştir. Çiçeklenme analizi 144 saat (6gün) devam etmiştir. Numunelerin üzerinde çatlakların oluşması ile test son bulmuştur.

### 3.3.6 Kılcallık ile Su Emme Analizi

Kapilarite analizleri 28 günlük oda sıcaklığında bekletme ile 100x100x100mm numunelere yapılmıştır. Analiz öncesinde numunelerin sabit nem seviyesine getirilmesi amacıyla köpük numuneler etüvde 24 saat boyunca 105 ° C’de kurutulmuş ve sonrasında soğutulmuşlardır. Testler sırasında tek eksenli su akışını korumak için ve buharlaştırıcı etkileri önlemek amacıyla, numunelerin dört yüzeyi 1 cm yüksekliğinde parafin ile kapatılmıştır (Şekil 3.9). Örnekler suya yerleştirilmeden önce başlangıç kuru ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler 1 cm yüksekliğindeki parafin tabakasının yüksekliğini geçmeyen su seviyesinde bir ızgara üzerine yerleştirilerek test gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sadece bir yüzeyi su ile doğrudan temas halinde tutulmuş ve zaman tutularak numunelerin kütlelerindeki artışlar kaydedilmiştir.



Şekil 3.9 Yüzeyleri parafin ile kaplanan numuneler ile kılcallık analizi.

Kılcallık katsayısı aşağıdaki ifadeyle hesaplanmıştır (3.3):

$$S = \frac{Q}{A} / \sqrt{t} \quad (3.3)$$

S'nin kılcallık ( $\text{cm/s}^{1/2}$ ) olduğu durumda Q, emilen suyun hacmidir ( $\text{cm}^3$ ), A, su ile temas eden yüzey alanıdır ( $\text{cm}^2$ ) ve t, süredir (dk).

### 3.3.7 Kıvam Analizi

Geopolimer malzemeler için kıvam analizinin yapılması için yaygın olarak kullanılan yöntemler Ford kap, Gallenkamp ve Brookfield vizkozimetresidir. Ford kap, altında bilinen çapa sahip deliği olan, malzemenin yerçekimi ile döküldüğü bir hunidir. Ölçüm, huniyi bilinen bir hacim ile doldurarak ve boşaltma süresini ölçerek gerçekleştirilir. Akış süresi ne kadar büyük olursa, sıvının viskozitesi o kadar büyük olur. Açıklığın çapını değiştirmek (ölçülebilir viskozite aralığını genişletmek için) veya numunelerin zamana bağımlılığı hakkında bir fikir sahibi olmak için ölçümler yapmak mümkündür. Yapılan deneysel çalışmalarda Ford kap5 kullanılmıştır. Bunun sebebi Fordcup 2, 3 ve 4'te akışın rahat sağlanamamış olmasıdır.

Reçetelerdeki içerik farklılıklarının karışım kıvamı üzerindeki etkisi, hazırlanan geopolimer çamurlarının akış çaplarının ölçülmesiyle yayılma tablası yardımıyla belirlenmiştir. ASTM C1437 standardı esas alınarak Fordcup5 yardımıyla ölçülen karışımların sonuçlar yayılma tablasında ölçülen yayılma çapları ile ilişkilendirilmiştir.

### **3.3.8 Civa Porozimetresi**

Gözenek boyutu ve gözenek hacmi dağılımı analizi Micrometrics marka civa intrüzyon porozimetresi (MIP) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MIP analizinden önce, geopolimer monolitler (1x1x2 cm) etüvde 105°C'de 48 saat kurutulmuştur.

### **3.3.9 XRD**

Numunelerin kristal yapılarını incelemek için X-Işınları Difraksiyon (XRD) yöntemi kullanılmıştır. Hammaddelerin XRD analizleri Shimadzu marka XRD-6000 model bakır (Cu) X-ışını tüpüne cihaz ile 1,544 Å dalga boyunda Bakır K $\alpha$  X-ışını ile gerçekleştirilmiştir. Her numune 5-80° arasında 2°/dk hızla analiz edilmiştir. Faz tanımlamada EVA yazılımı kullanılmıştır.

### **3.3.10 Taramalı Elektron Mikroskobu**

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla numunelerin mikro yapıları incelenmiştir. Analizde W (Tungsten) filament ile çalışan LEO 1430 VP model SEM cihazı kullanılmıştır. Numuneler iletken olmadığından dolayı yüzeyleri karbon (C) ile kaplanmıştır. İkincil elektron (secondary electron) görüntüleri 20kV hızlandırma voltajıyla elde edilmiştir. Numunelerin kimyasal analizleri de enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) yardımıyla 20kV hızlandırma voltajı ve X-Flash dedektörü yardımıyla yapılmıştır.

### **3.3.11 Image-J Programı ile Gözenek Analizi**

Image-J programı hazırlanan köpük numunelerdeki gözenek analizinin gerçekleştirilmesi ve civa porozimetresi ile elde edilen verilerin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Image-J programında gözenek analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla eşit büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kullanılmıştır. Analiz esnasında tüm görüntü tipleri 8bit olacak şekilde ayarlanmıştır. Gözenek analizi sırasında takip edilen işlem basamakları şu şekildedir.

File, Open, Select image ile görüntü seçilir. Image, Type, 8bit ile görüntü 8 bite çevrilir. Magnifying glass yardımıyla scale bar ın üzerine yaklaşılır. Straight line ile scale bar üzerine aynı boyutta çizgi çizilir ve analyze, set scale alanından görüntünün referans boyutu tanımlanır. Known distance alanına scale bar uzunluğu girilir ve unit of length tanımlanarak piksel birimi tanımlanır. Rectangle tool ile tüm resim seçilir ve Image, Duplicate ile resim çiftlenir. Analiz edilecek alandaki gözenekler düzgün cidarlı ise oval selections ile seçilir ve Ctrl+X ile kesilir. Düzgün cidarlı olmayan gözenekler için Freehand selection ile gözenekler seçilir ve Ctrl+X ile kesilir. Image, adjust, treshold ile gözenekler programa tanımlanır. Analyze, analyze particles ile seçili gözeneklerin özellikleri tanımlanır.

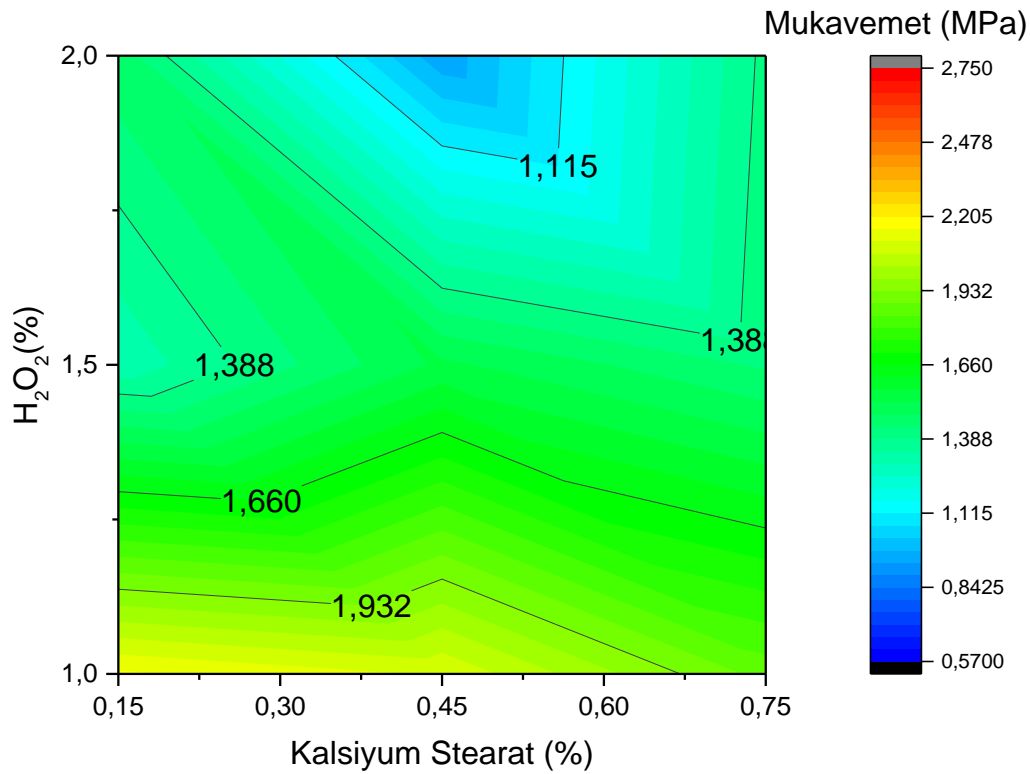
### **3.3.12 FTIR**

FTIR spektroskopisi, uçucu kül esaslı geopolimerde bulunan kimyasal bağları tanımlamak için kullanılmıştır. Kızılötesi (IR) Spektroskopisi temel olarak kızılötesi ışığın incelenen madde tarafından soğurulmasına dayanmaktadır. Soğurulma, moleküldeki bağların titreşimi ve dönüşleri için gerekli miktarda dalga enerjisinin, cihaz tarafından elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinden gönderilmesiyle gerçekleşir. Spektrumlar, birçok farklı bileşen için örnekleri taramak için kullanılabilen ayırt edici bir moleküler parmak izi olan numunenin bir profilini üretir. FTIR, geopolimerizasyon sırasında fonksiyonel grupları tespit etmek ve kovalent bağ bilgilerini karakterize etmek için etkili bir yöntemdir. Numuneler  $4000-400\text{cm}^{-1}$  spektrum aralığında elmas ATR spektroskopisi ve absorpsiyon spekturumu ile karakterize edilmiştir. Numunelerin ölçümleri Atatürk Üniversitesi DAYTAM'da yapılmıştır.

#### 4. BULGULAR

Bölüm 3.2.'de de belirtildiği üzere deneysel tasarım yöntemi kullanılmadan deney yapıldığında, sonucu etkilediği düşünülen her faktör üzerinde değişiklikler yapılarak en iyi değerlere ulaşana kadar sadece bir değer değiştirilip diğer değerler sabit tutularak o faktörün etkisi gözlemlenmeye çalışılır. Fakat farklı faktörler bir araya geldiğinde birbirlerini etkilemeleri kaçınılmazdır. İkinci faktör için en iyi değerlere ulaşmaya çalışıldığında bu kez ilk faktör için optimum değerden uzaklaşmış olunacaktır. Faktör seviyelerinde yapılan her değişiklik de kişiyi tüm seviyelerde değişiklik yapmaya yöneltecektir. Bu sayede her faktörün etki seviyesi ayrı ayrı anlaşılabilir olsa da, süreci tam anlamıyla anlayabilmek mümkün olmayacak, faktörlerin birbirleriyle olan etkileri çözülemeyecektir.

Geopolimer reaksiyonlarının karmaşıklığı ve hassaslığı sebebiyle sadece bir faktörün değiştirilip diğerlerinin sabit tutularak deneysel çalışmaların sürdürülmesinin çok etkili bir yöntem olmadığı düşünülmüş ve sütun grafikleri, çizgi grafikleri gibi grafiklerin bu karmaşık sistemi çözmeye yetmeyeceği kanaatine varılmıştır. Bu sebeple kontur grafiklerinden faydalanılarak kapsamlı olarak her faktör incelenmeye çalışılmıştır.

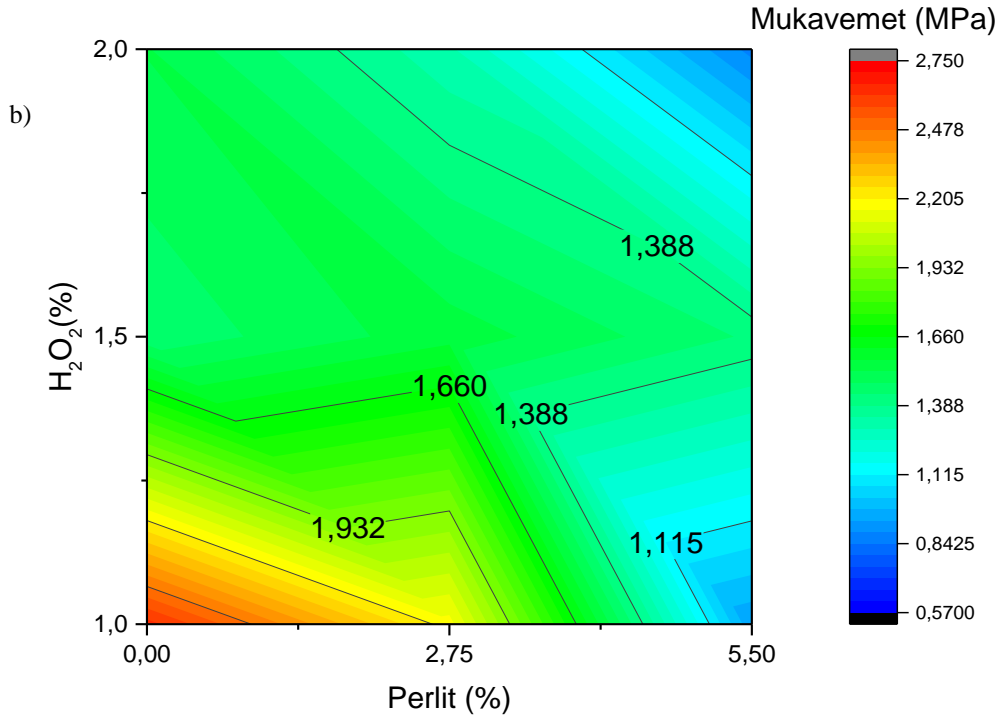
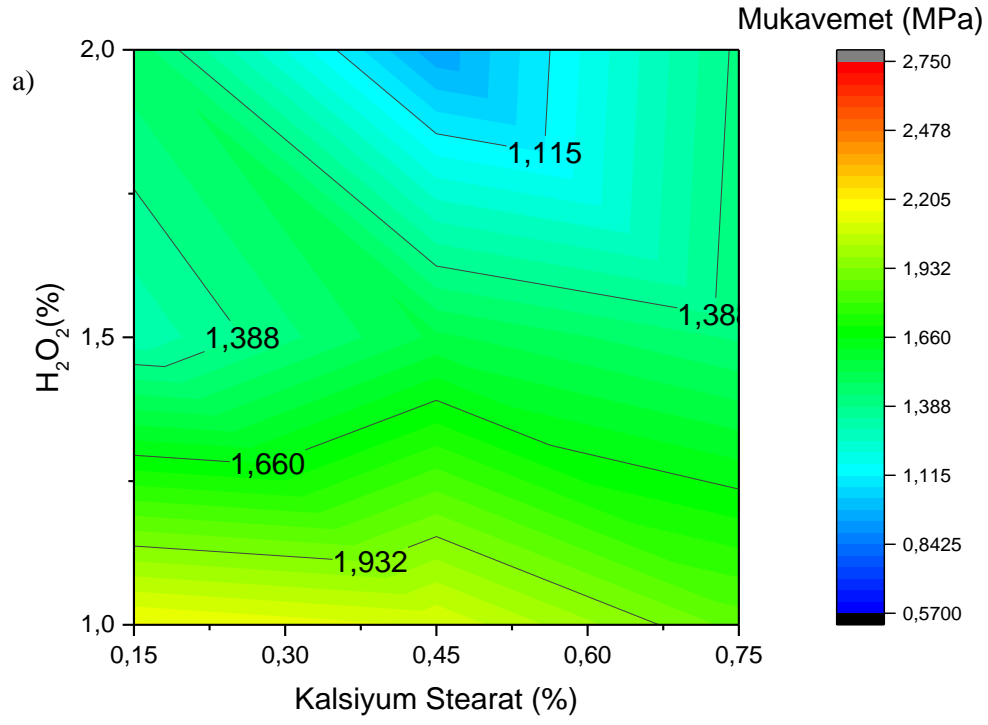


Şekil 4.1 Kontur grafiklerinin analiz edilmesi.

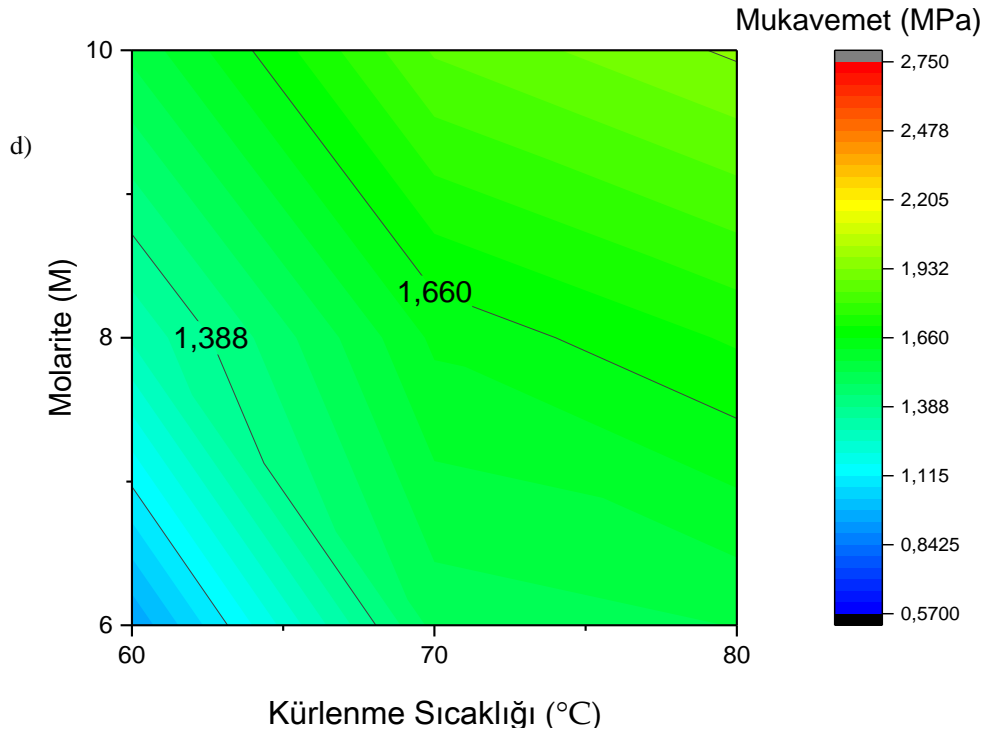
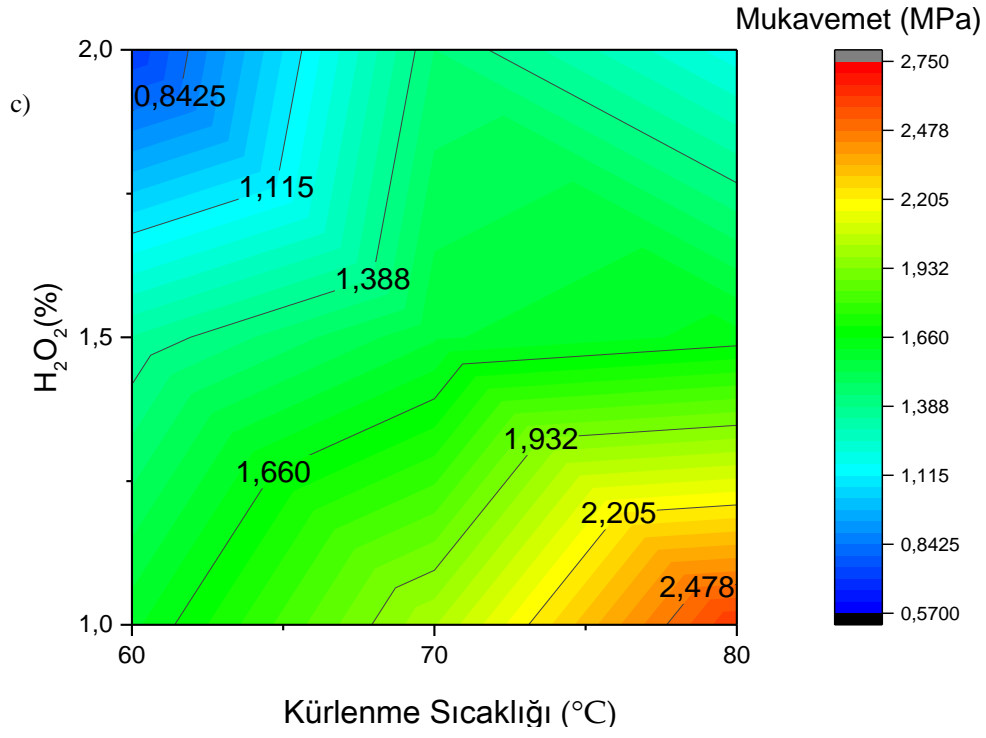
Deneyisel çalışmalar bölümünde belirtildiği üzere 54 farklı reçete hazırlanmış, her reçete için numuneler dökümü ve her numunenin analizleri yapılmıştır. Şekil 4.1'de verilen kontur grafiğinin çizilebilmesi amacıyla hazırlanan 54 farklı reçetenin mukavemet değerleri ölçülmüş ve programın hesapladığı reçetelerin karşılıklarına değerler yazılmıştır. Program, geliştirilen algoritmaya göre sonuçları analiz etmiş ve yukarıdaki şekilde verilen kontur grafiği çizdirmiştir. Yukarıda örnek olarak verilen grafikte hidrojen peroksit ve kalsiyum stearat değerleri göz önünde bulundurularak grafik çizdirilmiştir. Grafiğin sağ köşesinde verilen renkler farklı mukavemet değerlerini göstermektedir. Örneğin en altta verilen mavi tonları 0.5MPa'ı gösterirken kırmızıya doğru gittikçe bu aralıkta bulunan her rengin mukavemet değerlerinin yükselmesini temsil etmektedir. Çizdirilen kontur grafiği bütünüyle incelendiğinde ise hangi kalsiyum stearat ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğine göre köpük numunedeki mukavemet dağılımı kolaylıkla anlaşılmaktadır.

#### **a. Mekanik Özellikler**

Çizelge 3.6'da detayları verilen reçetelerin sıcaklık, peroksit, molarite, kalsiyum stearat ve perlit değişkenlerinin mukavemet üzerindeki etkileri incelenerek kontür grafikleri çizdirilmiştir. Sırasıyla grafikler incelendiğinde Şekil 4.2a'da H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı artışının mukavemet değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Denemeler sırasında elde edilen maksimum mukavemet değerlerine yaklaşık %1.0 oranında hidrojen peroksit ve % 0.15-0.6 arasında kalsiyum stearat içeren numunelerde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Kalsiyum stearat miktarındaki artışın mukavemet üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.2b'de görüldüğü üzere agrega olarak eklenen perlit miktarındaki artışın mukavemet değerlerinde ciddi anlamda düşüşe sebep olduğu gözlemlenmiştir. %1.0 hidrojen peroksit ve <%5.0 perlit içeren numunelerde 2.5MPa üzerinde mukavemet değerlerine ulaşılırken peroksit ve perlit miktarındaki artışın mukavemet değerlerinin kademeli olarak düşürdüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.2c'den anlaşılacağı üzere kürlenme sıcaklığındaki artış mukavemet artışını olumlu yönde etkilemektedir. %1.0 hidrojen peroksit içeren numunenin kürlenme sıcaklığı 60°C iken mukavemeti 1.5-2.0MPa arasında ölçülürken 70°C'de kürlenmiş numune 2.0-2.5MPa mukavemet göstermekte ve kürlenme sıcaklığı 80°C iken mukavemet 2.5MPa'ın üzerine çıkmaktadır. Şekil 4.2e ve 4.2f incelendiğinde ise yaklaşık %90.0 Uçucu kül içeren numunelerin beklenen mukavemet değerlerini karşılayan kompozisyonlar oldukları gözlemlenmiştir.

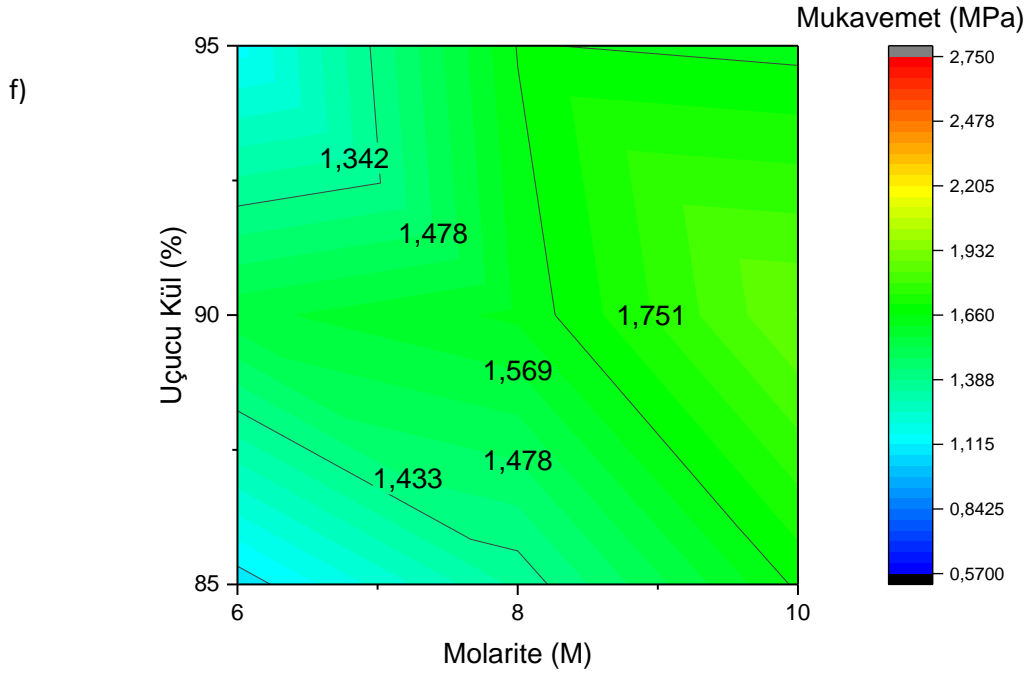
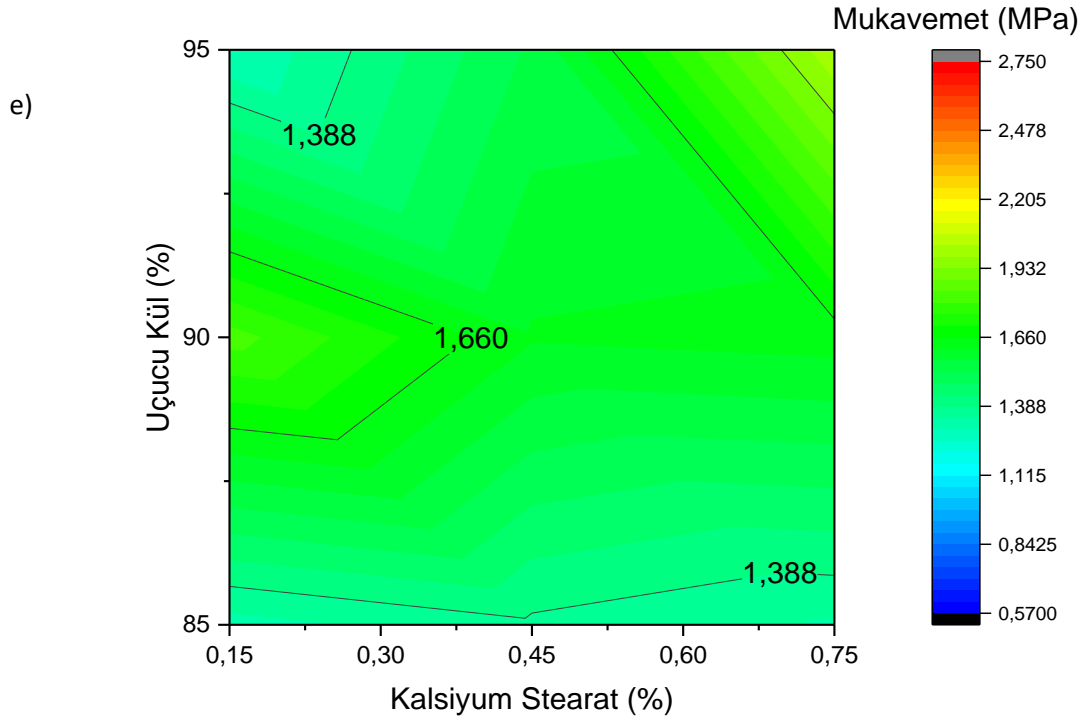


Şekil 4.2 Mukavemet değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle gösterimi .



**Şekil 4.2 (Devamı)** Mukavemet değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle gösterimi.



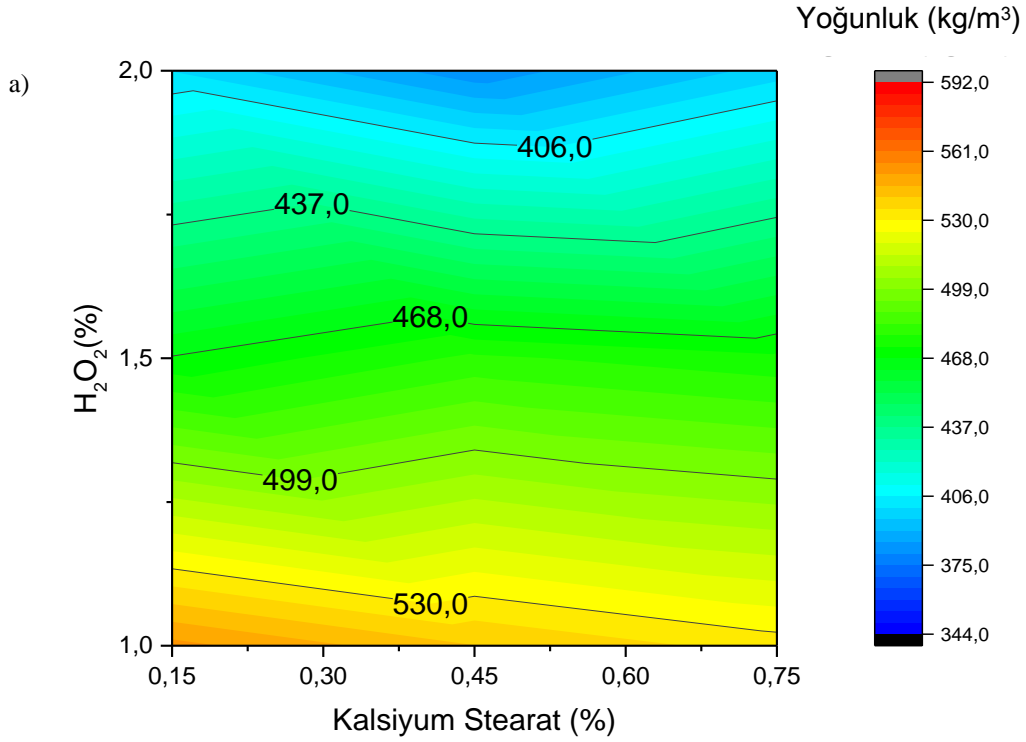


**Şekil 4.2 (Devamı)** Mukavemet değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle gösterimi a) Mukavemet değerlerine peroksit- kalsiyum stearat etkisi b) Mukavemet değerlerine hidrojen peroksit-perlit etkisi, c) Mukavemet değerlerine sıcaklık-peroksit etkisi, d) Mukavemet değerlerine sıcaklık ve molarite etkisi e) Mukavemet değerlerine kalsiyum stearat –uçucu kül etkisi, f) Mukavemet değerlerine molarite- uçucu kül etkisi.

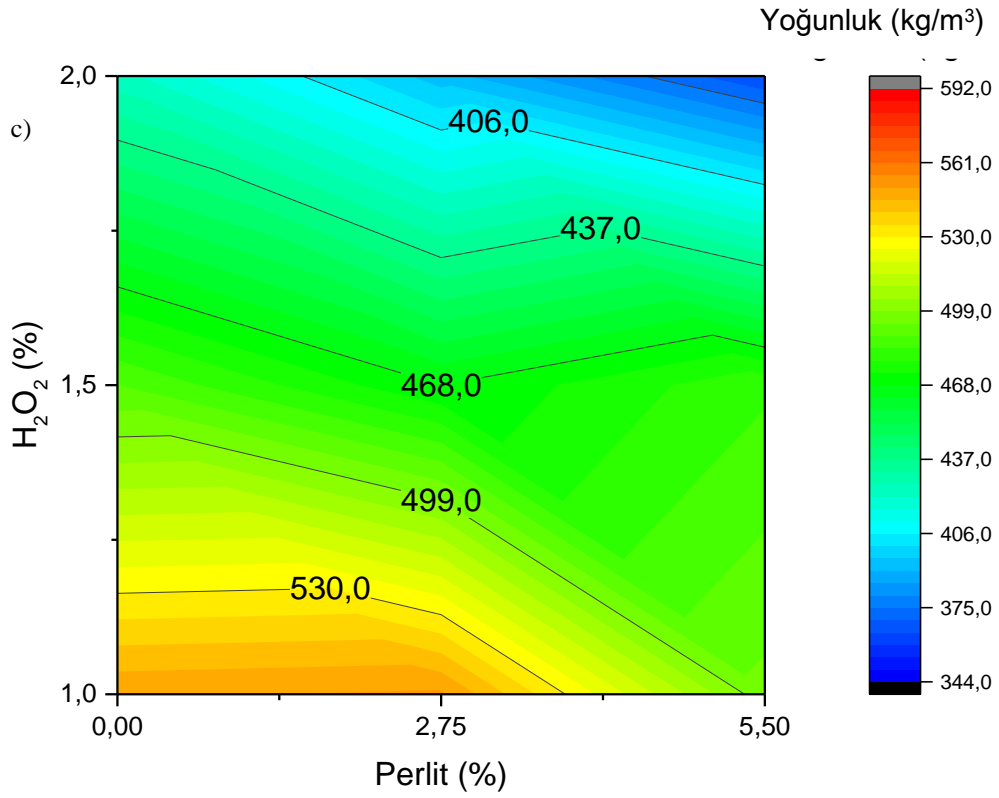
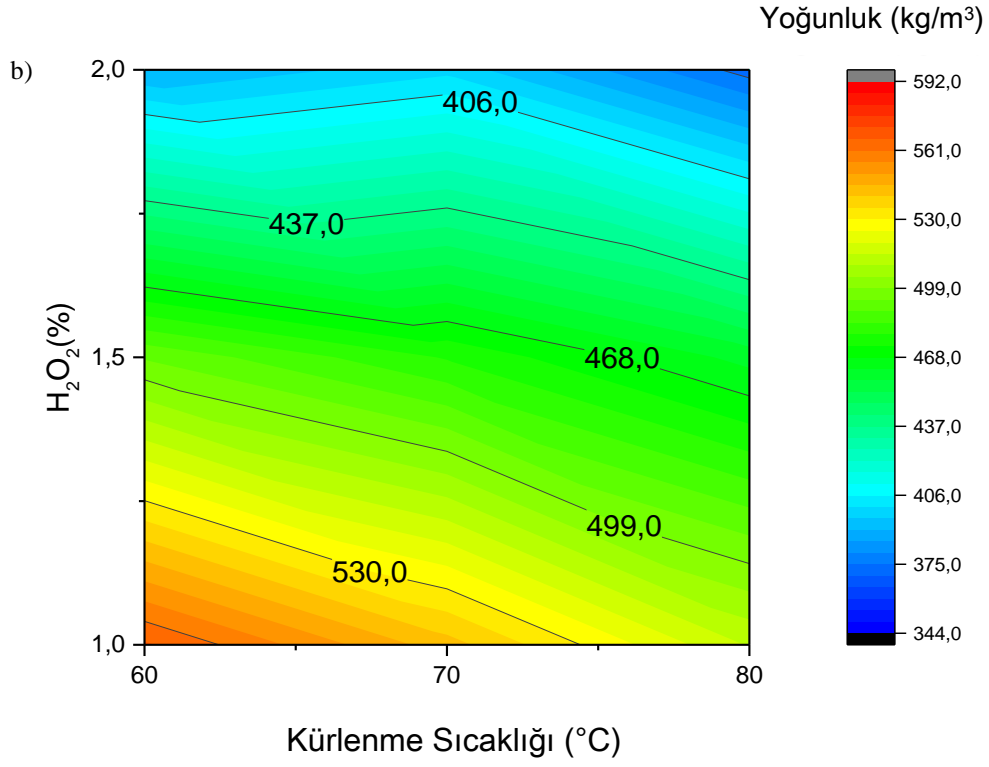
## 4.2 Fiziksel Özellikler

### 4.2.1 Yoğunluk

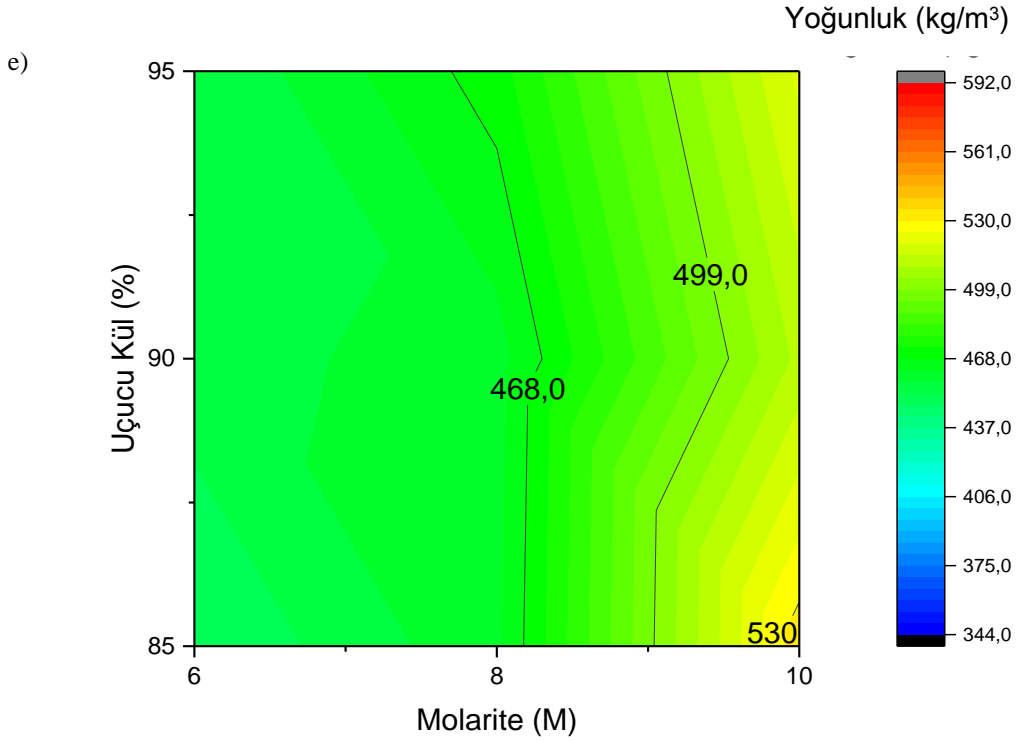
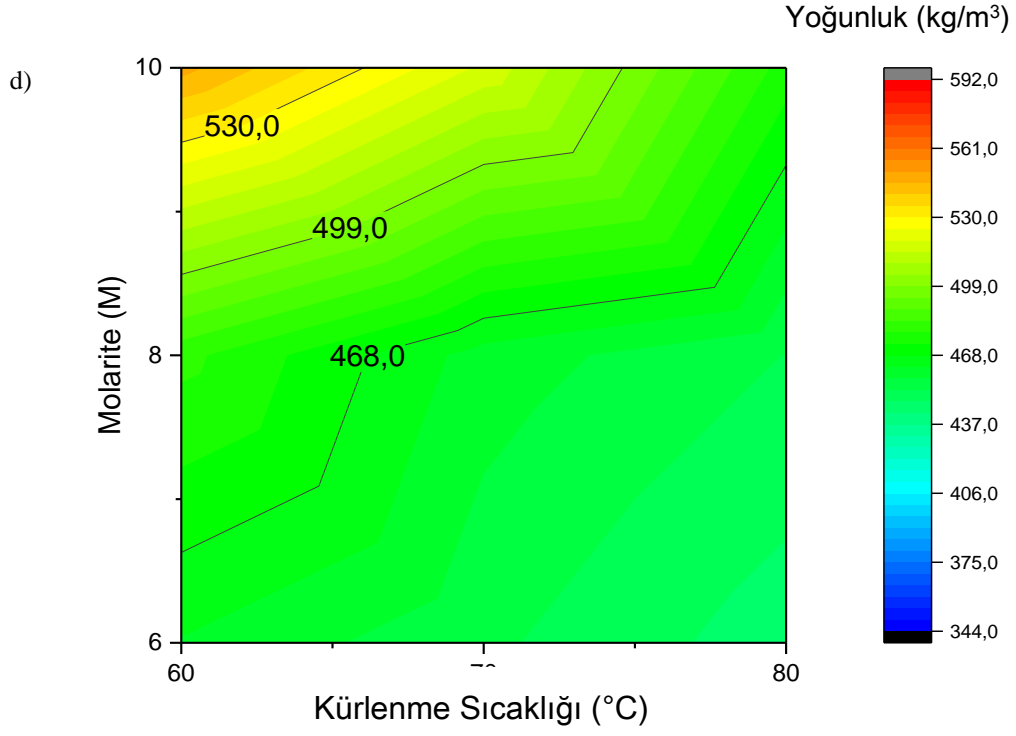
Şekil 4.3'de numunelerin yoğunluklarının etkilendiği değişkenler gözlemlenmek amacıyla kontür grafikler çizilmiştir. Şekil 4.3a'da numune yoğunluklarının kullanılan kalsiyum stearat miktarından bağımsız olarak doğrudan hidrojen peroksit miktarı ile değiştiği analiz edilmektedir. Şekil 4.3b de de hidrojen peroksit miktarının yoğunluk değerleri üzerinde perlitten daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 4.3c ve 4.3d ye bakıldığında ise yoğunluk değerlerinin az da olsa sıcaklık artışından etkilendiği ve molaritenin artması ile yoğunluk değerlerinde artış olabileceği gözlemlenmiştir. Şekil 4.3e'deki grafik de yoğunluk değerleri üzerinde uçucu kül miktarının çok fazla etkisi olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.3 Yoğunluk değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontür grafiklerle gösterimi.



**Şekil 4.3 (Devamı)** Yoğunluk değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle gösterimi.



**Şekil 4.3 (Devamı)** Yoğunluk değerinin faktör oranlarına göre değişiminin kontur grafiklerle gösterimi a) Yoğunluk değerlerine peroksit- kalsiyum stearat etkisi b) Yoğunluk değerlerine peroksit-perlit etkisi, c) Yoğunluk değerlerine sıcaklık-peroksit miktarının etkisi, d) Yoğunluk değerlerine sıcaklık-molarite etkisi e) Yoğunlukdeğerlerine molarite- uçucu kül miktarı etkisi.

TSE 13655 standartlarına göre neredeyse tüm numunelerde 450-550kg/m<sup>3</sup> yoğunluk değerlerinde çalışılmıştır. Hidrojen peroksit miktarının %1.5 üzerine çıktığında 450kg/m<sup>3</sup> yoğunluk değerinden daha düşük değerler elde edilmiştir.

#### 4.2.2 Çiçeklenme Davranışı

Çiçeklenme deneyi için Box Behnken metodu ile hazırlanan deney tasarımından sadece sıcaklık ve molaritenin değişken olarak kullanılabilmesi altı adet numune seçilmiştir. Seçilen numunelerin deney içeriği Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Numunelerin kodları molatite ve sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenmiştir.

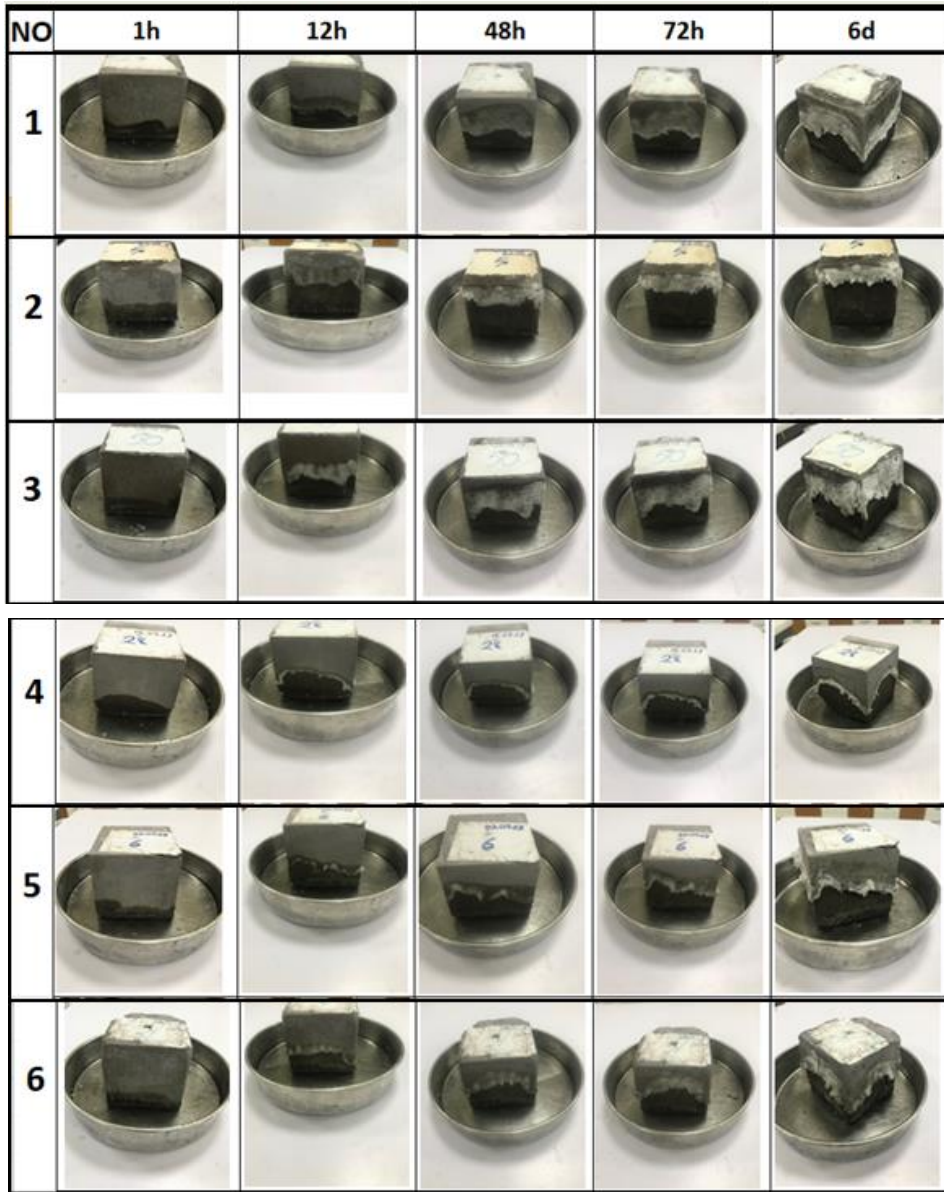
**Çizelge 4.1** Çiçeklenme analizi için seçilen numuneler.

Numune Kodu	DT Kodu	Uçucu Kül (%)	Metakaolen (%)	Molarite (M)	Köpürtücü Ajan (%)	Kürleme Sıcaklığı (°C)
1	27	90	10	10	6	80
2	5	90	10	10	6	70
3	50	90	10	10	6	60
4	28	90	10	6	6	80
5	6	90	10	6	6	70
6	51	90	10	6	6	60

DT Kodu\*: Deney tasarımında programın atamış olduğu kod

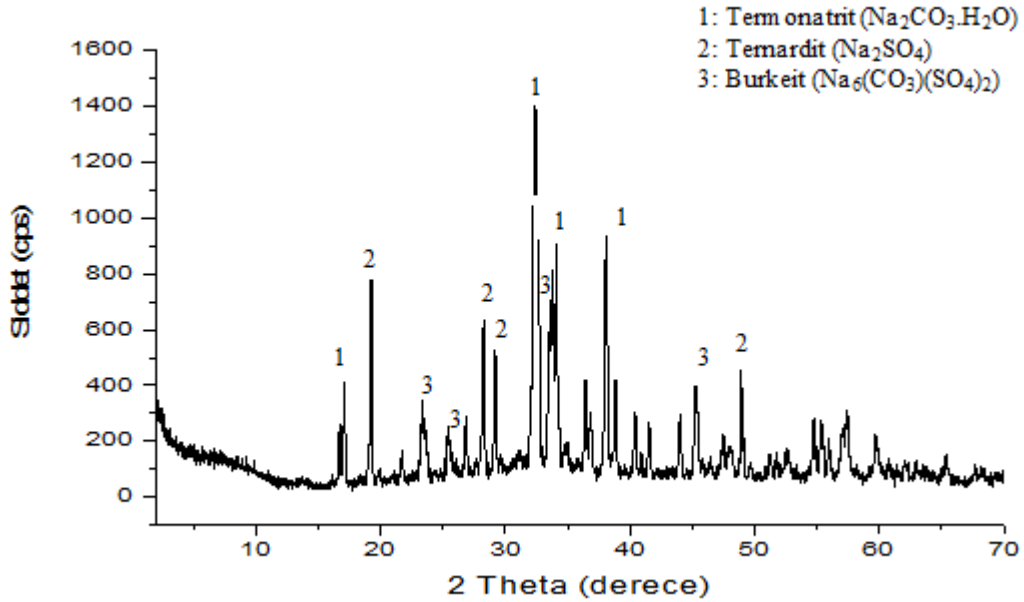
Çiçeklenme probleminin gözlemlenebilmesi için 28 günlük 100x100x100mm boyutlarındaki numuneler sadece bir yüzeyleri su ile temas edecek şekilde 6 gün boyunca su içerisinde bekletilmiştir ve aralıklarla fotoğraflanmıştır (Şekil 4.4).

İlk üç numune 10M'lık alkali karışım ile, ikinci üç numune ise 6M'lık alkali karışım ile hazırlanmıştır. Kürleme sırasında 80, 70 ve 60°C sıcaklıklarda 24 saat kürleme yapılmıştır. Şekil 4.4'deki görüntülerde sunulduğu üzere sabit molaritede hazırlanan numunelerin kürleme sıcaklığının düşmesi ile numune üzerindeki beyaz tuz oluşumları artmaktadır. Aynı zamanda farklı molaritelerde ve eşit sıcaklıkta kürlenerek hazırlanan numunelerin üzerinde oluşan çiçeklenmelerde daha düşük sıcaklıklarda hazırlanan numunelerin üzerinde daha fazla oluşum gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 Tek yüzeyleri su ile temas haline tutulan geopolimer numuneleri.

Tüm numunelerde yaklaşık 12 saat sonra yüzeyde çiçeklenmeler gözlemlenmiştir ve yüzeyde oluşan beyaz tuz birikintileri zaman geçtikçe miktarsal olarak artmıştır. Başlangıçta çiçeklenme problemi sadece görsel olarak izlense de 6 gün sonunda numunelerde çatlama, kırılma, ayrışma gözlemlenmiş ve çiçeklenmenin ilerleyen dönemlerde malzemenin bütünlüğünü bozan bir problem olduğu sonucuna varılmıştır. Yüzeydeki beyaz tortuların kimyasal içeriği tespit edilmek üzere XRD analizi yapılmıştır (Şekil 4.5). Analizde sodyum içerikli bileşiklerin olduğu gözlemlenmiştir. Çiçeklenme probleminin temel olarak Na içeriğine bağlı olduğu teyit edilmiştir.



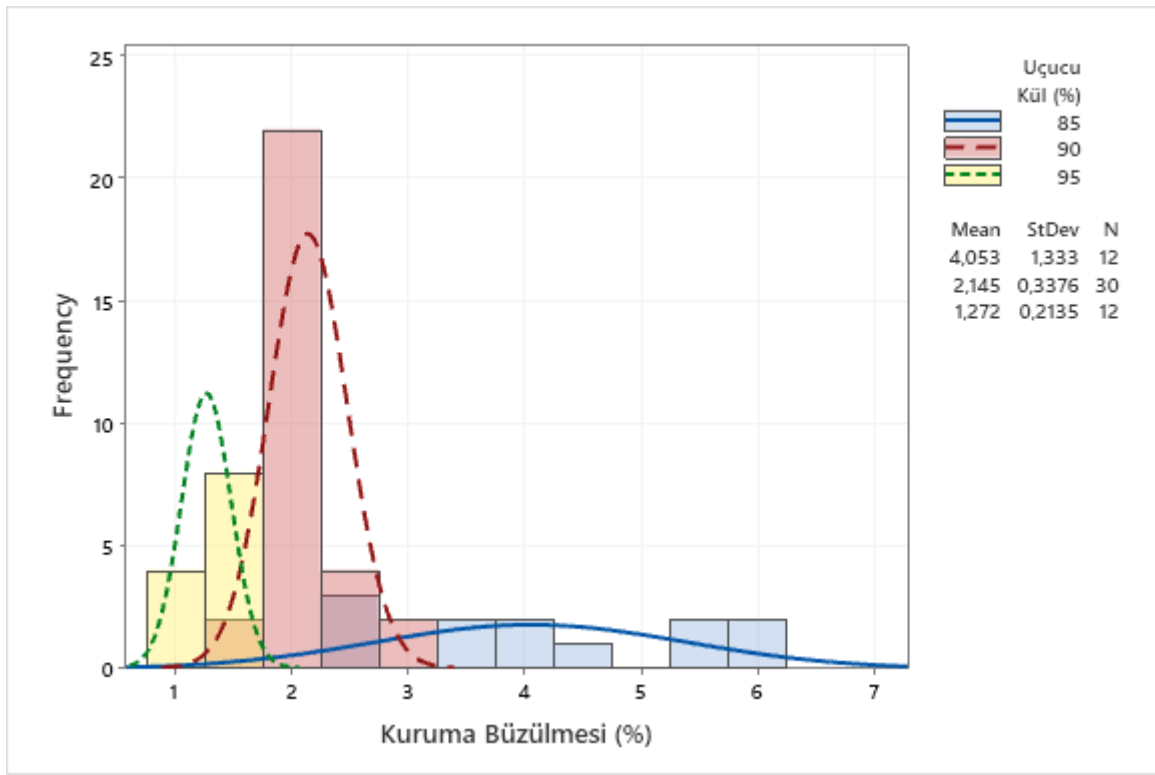
Şekil 4.5 Geopolimer yüzeyinden toplanan çiçeklenmenin XRD analizi.

Skvara vd. yapmış olduğu çalışmada Na ve K içeriğinin, Si-O-Al yapısındaki negatif yükü kompanse ettiğini bildirmiştir. Bu sebeple Na ve K içeriklerinin  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  olarak bağlanmasından ziyade  $\text{Na}, \text{K}(\text{H}_2\text{O})_n^4$  şeklinde yapıya daha zayıf bağlarla bağlandığını belirtmiştir. Bu sebeple rutubet varlığında, Na içeriğinin çiçeklenme sorunu yaratacak şekilde kapiler kuvvetler sayesinde yüzeye çıkıp biriktiğini söylemişlerdir. Bu sebeple  $\approx 600^\circ\text{C}$  sıcaklıkta numunelerin pişirilerek yapıdaki su içeriğinin uzaklaştırılması ile ancak bu sorunun çözülebileceğini ifade etmişlerdir (Škvara vd. 2008).

### 4.2.3 Kuruma Büzülmesi

#### *Kompozisyonlardaki Uçucu Kül Miktarının Kuruma Büzülmesine Etkisi*

Yapılan deneysel çalışmalarda %85, %90 ve %95 oranında uçucu kül içeren kompozisyonlar hazırlanmıştır. Kompozisyonların  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları sırasıyla 5.19, 5.44 ve 5.72 olarak hesaplanmıştır. Numunelerin uçucu kül içeriğindeki artış ile birlikte kuruma büzülmesi miktarlarının da azaldığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül içeriği %85 olan numunenin yaklaşık %4.053 oranında kuruma büzülmesi gösterdiği, %90 ve %95 oranında uçucu kül içeren kompozisyonların ise sırasıyla %2.145 ve %1.272 kuruma büzülmesi gösterdiği ölçülmüştür (Şekil 4.6).



**Şekil 4.6** Geopolimer kompozisyonlarının içerdiği uçucu kül-metakaolen miktarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analiz edilmesi.

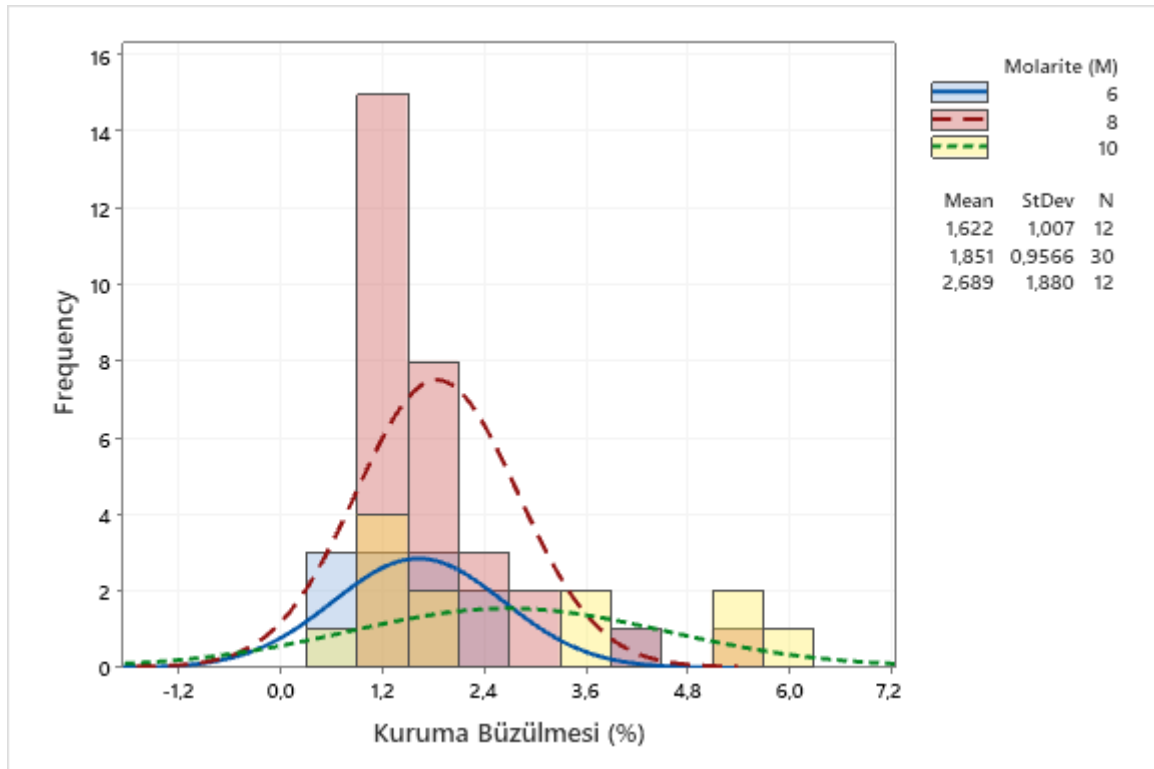
Kuruma büzülmesi konusu en kısa tanımlamayla numunelerin içerdikleri suyu bünyelerinden kaybetmeleri durumudur. Si:Al miktarı ile kuruma büzülmesi miktarının arasındaki ilişki incelendiğinde ise Kuenzel vd. yapmış olduğu çalışma ile ilişkilendirilebilir. Kuenzel vd. Si/Al oranındaki artışın, yapısal suyu azalttığını öne sürmektedirler (Kuenzel vd. 2012). Aynı zamanda Duxson vd. de yapmış oldukları çalışmada Si:Al oranındaki artışın  $^2\text{H}$  MAS NMR



spektrumlarının kademeli olarak genişlemesine neden olduğu ve “yapısal” su içeriğinin artan Si: Al oranı ile azaldığını ifade etmektedirler (Duxson vd. 2007). Buradan yola çıkarak içerikteki Al miktarının azalması ile yapısal su miktarının azalmasına sebep olan kompozisyon değişiminin, daha kararlı yapıya sahip kompozisyon elde edilmesine ve dolayısıyla da kuruma büzülmesinde azalmayı sağladığı görülmektedir. Diğer bir ifade ile kompozisyon içerisindeki uçucu kül miktarındaki artış  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  oranını arttırması ile kuruma büzülmesinde azalmaya sebep olmaktadır.

#### *Kompozisyonlardaki Molarite Değişiminin Kuruma Büzülmesine Etkisi*

Farklı molaritelerde hazırlanan karışımların  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 6, 8 ve 10M’lık karışımlar için sırasıyla 3.56, 3.08 ve 2.71 ( $\pm 0.02$ ) olarak değişiklik göstermektedir.  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları ise sırasıyla 1.47, 1.71, 1.95 ( $\pm 0.08$ ) olarak hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlerde molaritedeki artışların numunelerin kuruma kuruma büzülmesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Çizilen histogram grafiğinde sunulduğu üzere 6M’lık alkali karışım ile hazırlanan numuneler %1.62 büzülürken, 8M’lık numuneler %1.85 ve 10M’lık numuneler %2.68 kuruma büzülmesi göstermiştir (Şekil 4.7).

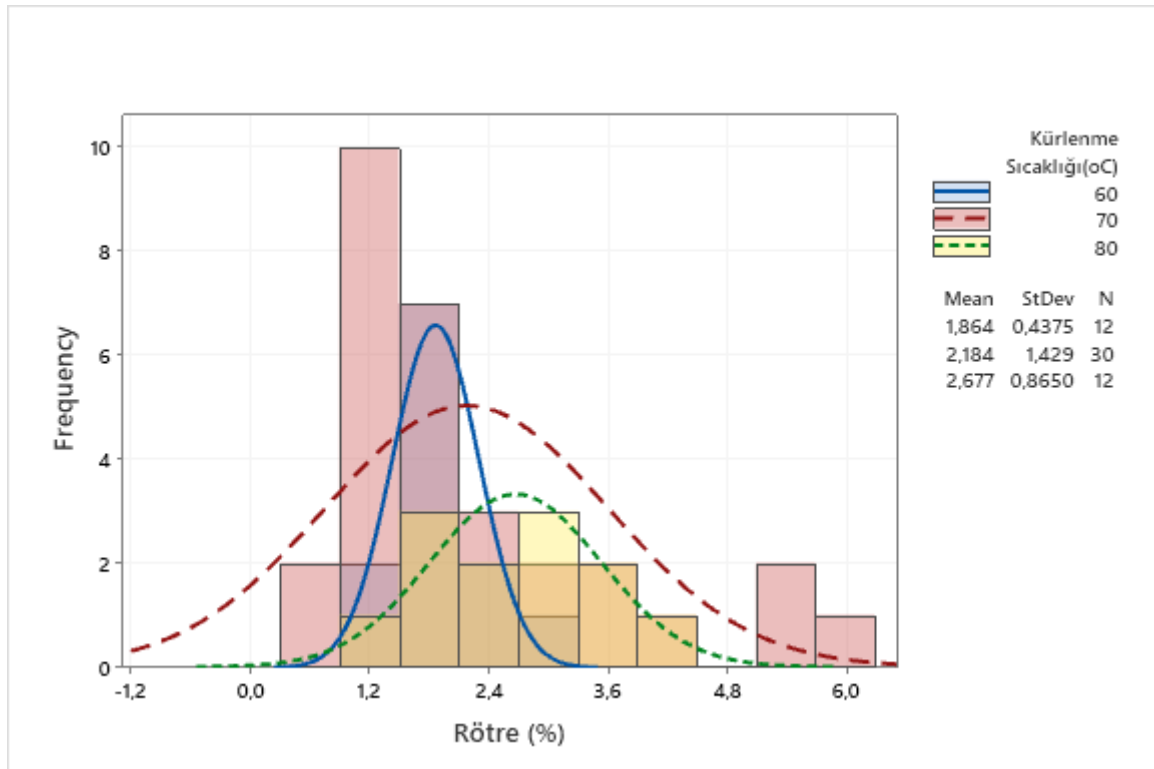


**Şekil 4.7** Geopolimer kompozisyonlarının molaritesine göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analiz edilmesi.

Skvara vd. Na<sup>+</sup> ve K<sup>+</sup> iyonlarının yapıya iyon olarak bağlanmalarından ziyade, alüminat tetrahedralarında yük yoğunluğunu sağlamak amacıyla Na,K(H<sub>2</sub>O) şeklinde zayıf bağlarla bağlandığını bildirmiştir (Škvara vd. 2008). Bu sebeple, molarite artışı ile yapıya fazla miktarda giren Na içeriğinin, zayıf bağlı Na,K(H<sub>2</sub>O) bileşiklerini artırması sebebiyle kuruma esnasında bünyeden uzaklaşarak kuruma büzülmesini arttırdığı düşünülmektedir.

#### *Kürleme Sıcaklıklarının Kuruma Büzülmesine Olan Etkisi*

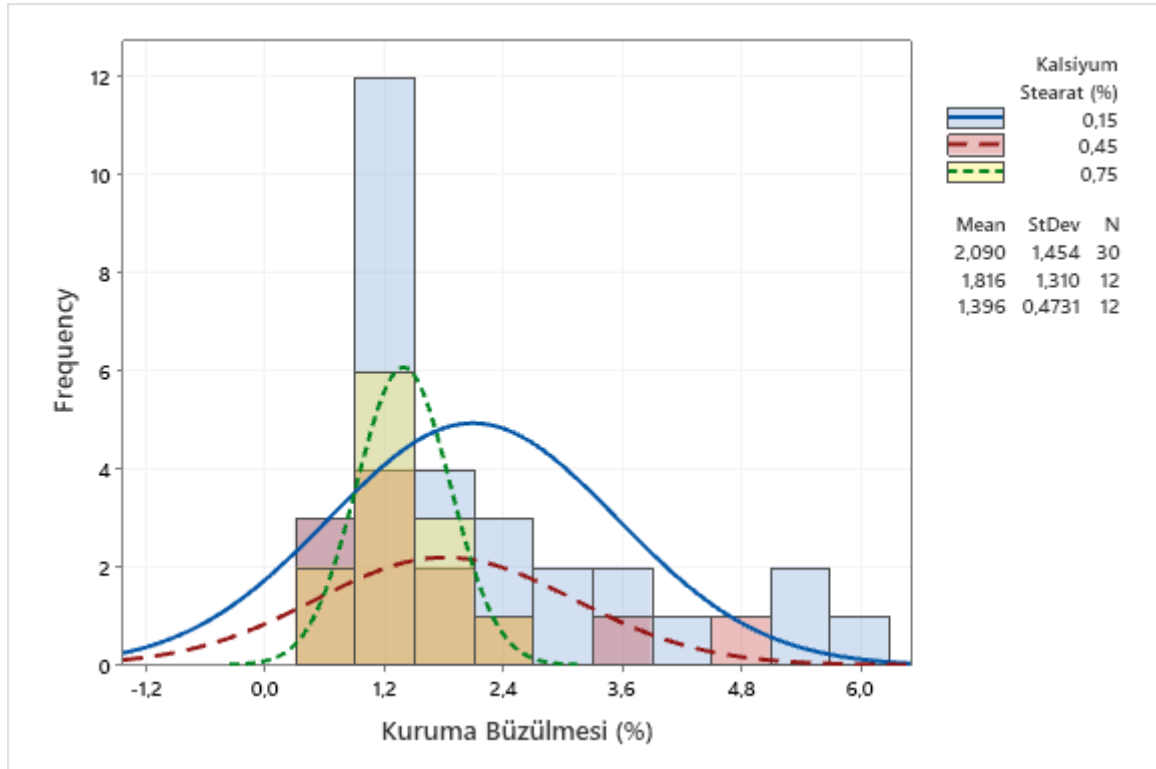
Yapılan çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer köpük numunelerin kürleme sıcaklıklarına göre kuruma büzülmeleri incelenmiştir. Kompozisyonlarında içerdikleri su miktarları aynı olan, sadece kürleme sıcaklıkları farklılık gösteren numunelerde kürleme sıcaklığının artması ile kuruma büzülmesinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. 60°C’de kürlenen numunelerde %1.86 kuruma büzülmesi gerçekleşirken 10°C artışın kuruma büzülmesini %2.18’e çıkardığı gözlemlenmiştir. 80°C’de kürlenen numunelerin kuruma büzülmelerinin ise %2.68’e çıktığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla kürleme sıcaklığının kuruma büzülmesinin artışına neden olduğu görülmüştür (Şekil 4.8).



**Şekil 4.8** Geopolimer kompozisyonlarının kürleme sıcaklıklarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analiz edilmesi.

### *Kalsiyum Stearat Miktarının Kuruma Büzülmesine Olan Etkisi*

Yapılan çalışmanın ayrıca kalsiyum stearat miktarının kuruma büzülmesi üzerine olan etkisi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Çalışmadaki bulgular incelendiğinde kalsiyum stearat miktarının kuruma büzülmesini azaltma konusunda etkili olduğu gözlemlenmiştir. Kompozisyonun içerisinde %0.15 oranında kalsiyum stearat varken kuruma büzülmesinin %2.090 olduğu ölçülürken %0.45'e çıkan kalsiyum stearat miktarının kuruma büzülmesini %1.816'ya ve %0.75'e çıkarılan kalsiyum stearat miktarının kuruma büzülmesini %1.396'ya düşürdüğü açıkça görülmüştür (Şekil 4.9). Bu durumun kalsiyum stearatın su itici özelliği sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.

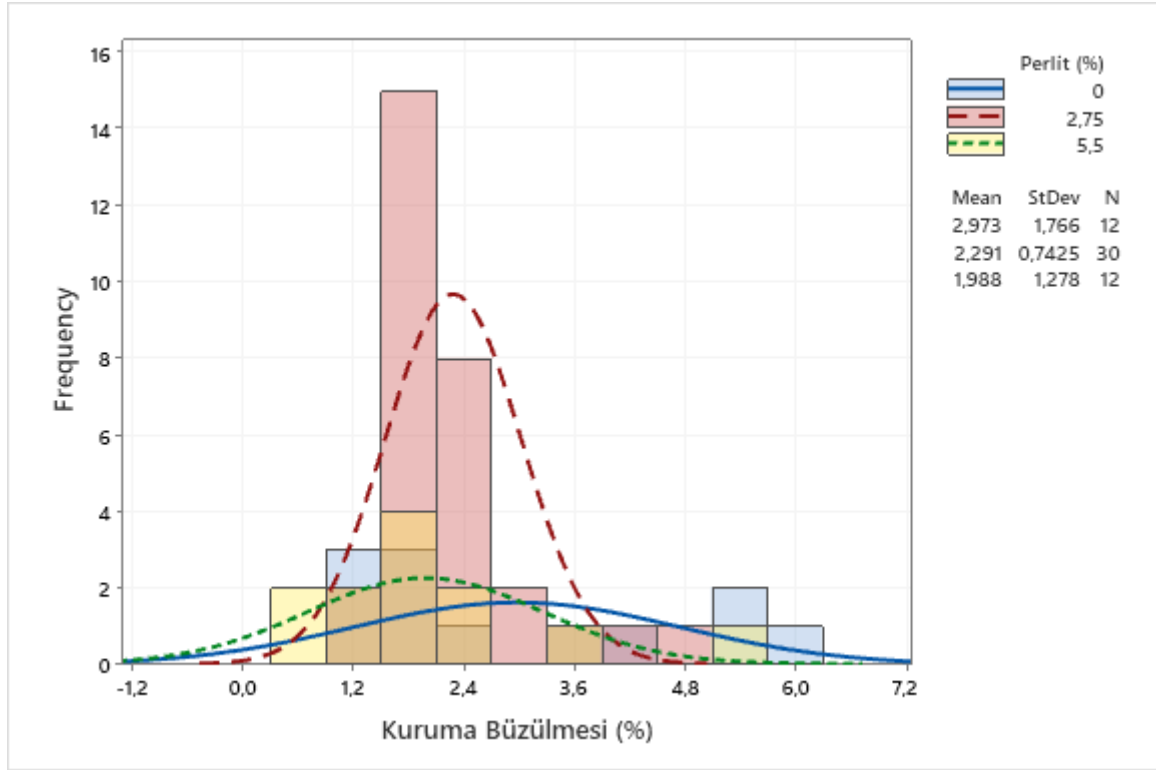


**Şekil 4.9** Geopolimer kompozisyonlarının kalsiyum stearat miktarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analiz edilmesi.

### *Perlit Miktarının Kuruma Büzülmesine Olan Etkisi*

Geopolimer köpük kompozisyonları içerisine genleştirilmiş perlit ilave edilmiştir. Perlit içermeyen numunelerde ortalama %2.97 oranında kuruma büzülmesi gözlemlenmiştir. Karışıma eklenen %2.75 oranında perlitin kuruma büzülmesi oranını %2.29'a çektiği gözlemlenmiştir. Perlit miktarının %2.75'den %5.5'a çıkarılması durumunda kuruma

büzülmesi 1.98'e gerilemiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Geopolimer kompozisyonlarının perlit miktarına göre kuruma büzülmesi ölçümlerinin histogram yardımıyla analiz edilmesi.

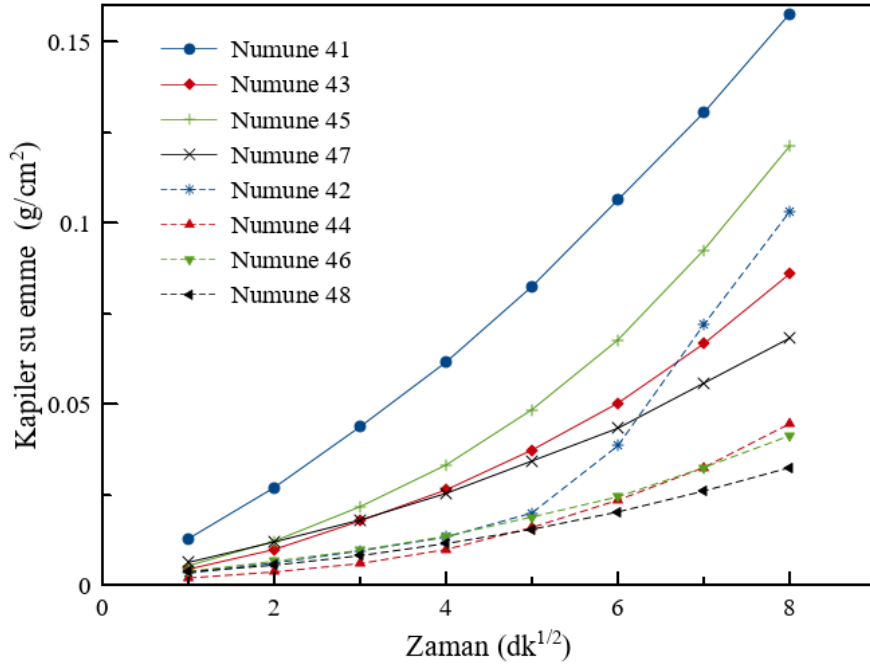
#### 4.2.4 Kılcallık

Kılcallık deneyi yapılan numunelerin reçeteleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Numunelerin kılcallık ile su absorpsiyonu verileri Şekil4.11'de sunulmuştur. Benzer içeriklere sahip reçetelerin veri grafikleri aynı renklerde çizilmiştir. Karışım molaritesi 6M olan reçetelerin grafikleri düz çizgi ile ve 10M olan reçeteleinin grafikleri keski çizgilerle çizilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Kılcallık analizi yapılan numune reçetelerine ilişkin bilgiler.

Numune Kodu	Uçucu Kül (%)	Metakaolen (%)	Kalsiyum Stearat (%)	Molarite (M)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	Kürlenme Sıcaklığı (°C)
41	90	10	0.15	6	1	70
43	90	10	0.75	6	1	70
45	90	10	0.15	6	2	70
47	90	10	0.75	6	2	70
42	90	10	0.15	10	1	70
44	90	10	0.75	10	1	70
46	90	10	0.15	10	2	70
48	90	10	0.75	10	2	70

Suyun kılcal boşluklar içerisindeki yükseliş Young-Laplace denklemine göre  $2T/r$ 'ye bağlıdır. Buradaki T yüzey gerilimini ve r gözenek yarıçapını ifade etmektedir. Dolayısıyla gözenek boyutunun küçülmesi ile numunelerin kılcallık özelliklerinin artması ve daha fazla su emmeleri beklenmektedir. Ancak Şekil 4.11'de verilen su absorblama özellikleri stearat miktarı ve molarite artışı ile birlikte gözenek boyutları küçülmüş olmasına rağmen numunenin su emme miktarı azalmıştır. Bu durum stearatın su itici özelliğine bağlanmıştır. Su emilimindeki düşüşün esas mekanizması hala tam anlamıyla açıklığa kavuşturulmamış olsa da, Izaguirre vd. kılcallık üzerindeki stearatlı katkıların etkisi hakkında bir çalışma rapor etmişlerdir. Çalışmalarına göre kalsiyum stearat, çoğu gözeneği tıkayan veya hatta tamamen mühürleyen hidrofobik film oluşturmaktadır (Izaguirre vd. n.d.). Bu durumun kalsiyum stearat türü katkı maddelerinin polimerik doğasından kaynaklanan bir mekanizması olduğu söylenmektedir (Lu ve Zhou 2000). Kalsiyum stearat çimento esaslı malzemelerde su itici olarak kullanılmaktadır (Izaguirre vd. n.d.).

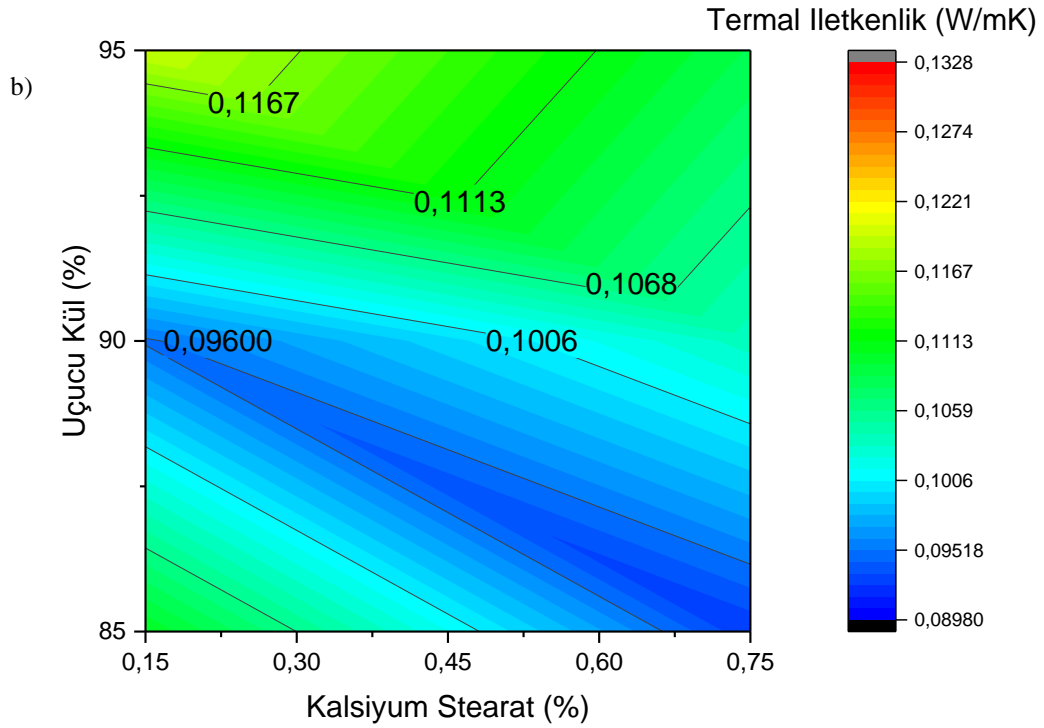
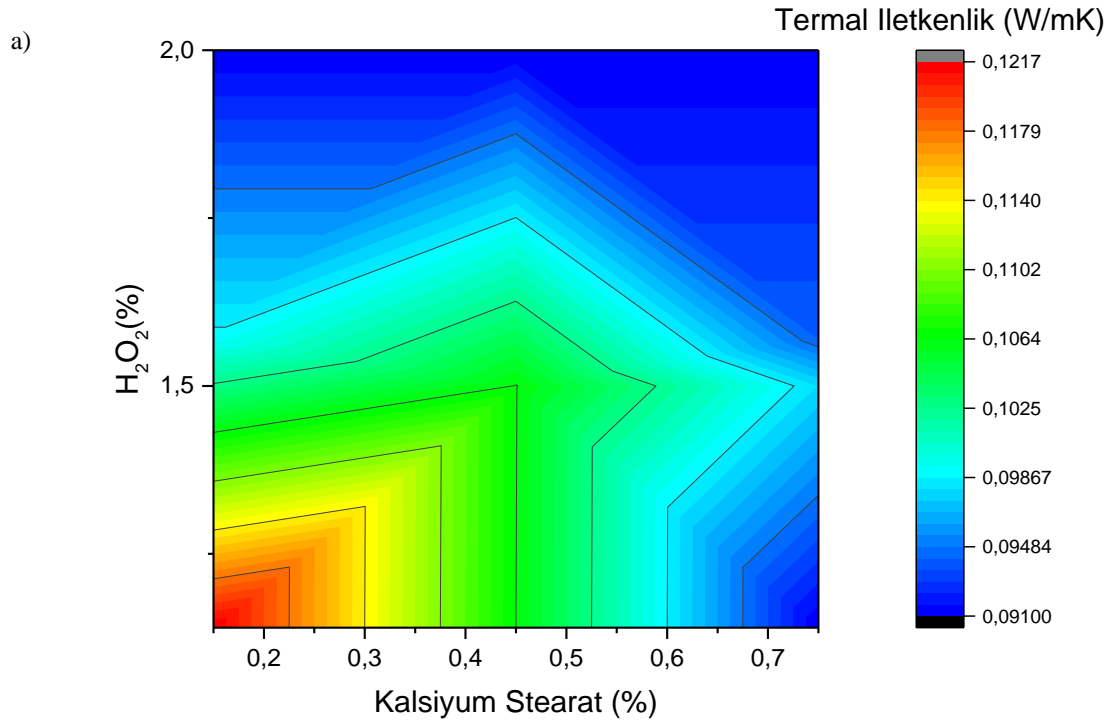


Şekil 4.11 Numunelerin kapiler zamana bağlı kapiler su emme miktarlarının incelenmesi.

Kılcallık, genellikle yağmur veya ıslak toprak gibi çevresel olaylara maruz kalabilen yapı malzemeleri için son derece önemli bir özelliktir. Su emen yapı malzemesi hasar görebilir ve bina yapısı içindeki su hareketi diğer malzemeleri etkileyebilir (Arandigoyen vd. 2005).

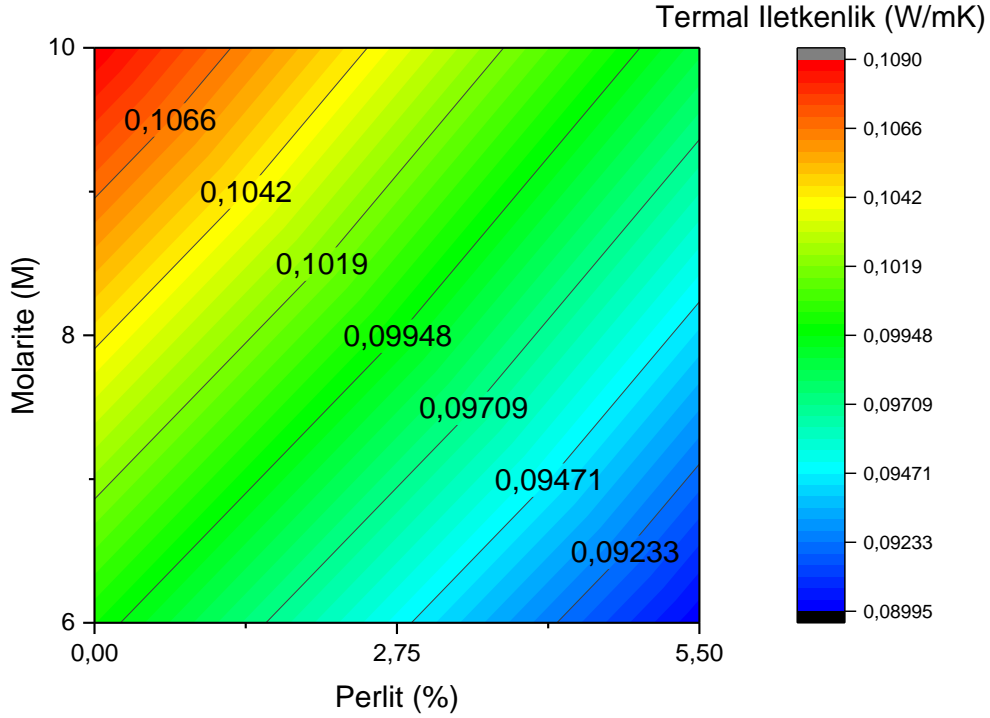
### 4.3 Termal Özellikleri

Isıl iletkenlik analizi için yardımıyla hazırlanan reçetelerin arasından seçilen numuneler kullanılmıştır. Bu numunelerde kalsiyum stearat miktarı, perlit miktarı, molarite ve uçucu kül-metakaolen oranları değişken olarak kullanılmıştır. Isıl iletkenlik ölçümleri yapı malzemelerinin ölçümü için sıklıkla tercih edilen yöntem olan sıcak plaka yöntemi ile yapılmıştır.



Şekil 4.12 Geopolimer köpük numunelerinin ısı iletkenlik değerlerinin analiz edilmesi.

c)



**Şekil 4.12 (Devamı)** Geopolimer köpük numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin analiz edilmesi. a)Uçucu kül- Kalsiyum stearat miktarının b)H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Perlite miktarının, c)Karışım molaritesi-Perlite Miktarının ısı iletkenliğe etkisinin incelenmesi.

Sonuçların kontur grafikleri çizdirildiğinde, uçucu kül miktarı artışının ısı iletkenlik değerlerini artırma yönünde etkilediği gözlemlenmiştir. Grafığe göre %90 oranında uçucu kül içeren geopolimer köpük numunenin ısı iletkenliği <0.090W/mK iken uçucu kül miktarının %92.5 oluşu ısı iletkenliği 0.10W/mK civarına çekerken kompozisyondaki uçucu kül varlığı %95 üzerine çıktığında ısı iletkenlik değerleri de >0.10W/mK değerlerine ulaşmaktadır (Şekil 4.12a). Kalsiyum stearat ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarlarının ısı iletkenlik üzerindeki etkisi incelendiğinde ise her ikisinin de miktarı arttıkça yalıtım özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmektedir. En düşük ısı iletkenlik değeri %0.75 kalsiyum stearat ve %2.0 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren köpük numunelerde elde edilmiştir. Alkali konsantrasyonu artışı köpük numunenin ısı iletkenlik değerini arttırarak yalıtım özelliğinin kötüleşmesine sebep olmaktadır. 6M'lık geopolimer köpüğün ısı iletkenlik değeri 0.095W/mK-0.10W/mK aratında değişirken molaritenin 8M ve 10M'a çıkarılması ısı iletkenlik değerlerinin 0.10W/mK-0.105W/mK ve >0.105W/mK olarak değişmesine sebep olmaktadır (Şekil 4.12c).



#### 4.4 Mikroyapı Özellikleri, Gözenek Yapısı ve Mineralojik Analiz

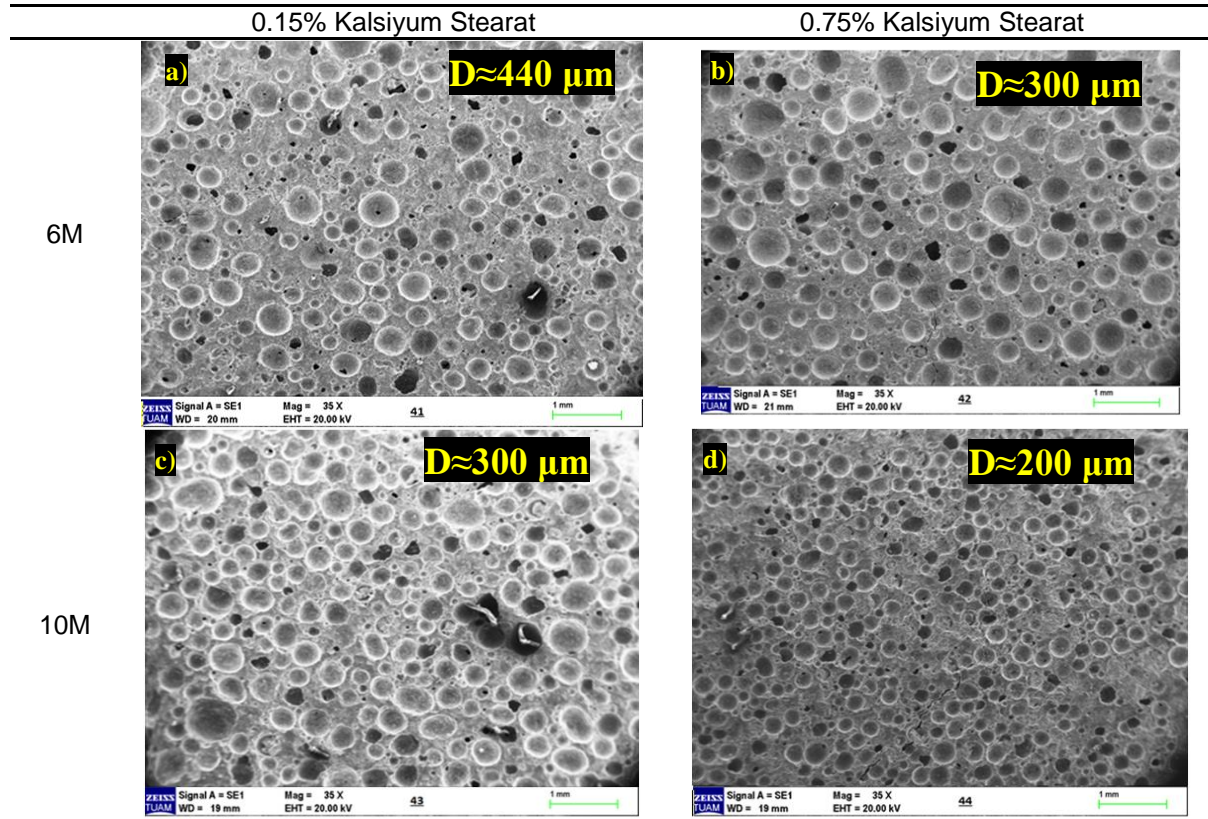
Bu bölümde geopolimer köpük numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS ile analizinden, optik mikroskopla görüntülenen numunelerin Image-J programı yardımıyla analizinden ve FTIR analizinden bahsedilecektir.

##### 4.4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu

Gözenek yapısının kalsiyum stearat ve molariteye bağlı olarak değişimi SEM ile analizi Şekil 4.13’de ve analiz edilen numunelerin içerikleri Çizelge 4.3’de sunulmuştur. Analizde sınırları belli olan, kapalı hücre yapısına sahip, NaOH ve kalsiyum stearat miktarına bağlı olarak gözenek boyutları değişen küresel hücreler gözlemlenmiştir. Çoğu hücre, küresel olmakla birlikte birbirine bağlı hücre pencereleri içermektedir. Analiz incelendiğinde stearatın gözenek büyüklüğü açısından önemli bir faktör olduğu anlaşılmaktadır. Kalsiyum stearat miktarı ile gözenek boyutunun önemli ölçüde küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bu durum kıvam analizinde gözlemlenen kalsiyum stearat miktarı artışı ile yayılma çapındaki azalma ve akış sürelerinin uzaması ile ilişkilendirilebilmektedir. Ayrıca karışımın alkali olmasını sağlayan NaOH de gözenek boyutunun küçülmesini ve gözeneklerin homojen dağılımlı olmasını sağlamıştır (Şekil 4.13). Geopolimer karışımları için önemli olan alkalilerin geopolimer mukavemeti üzerinde sağladığı etki kadar hücresel morfoloji üzerinde de etkisi olduğu fark edilmiştir. Bu durum gözenek boyutunun hem kalsiyum stearat miktarından ve hem de geopolimer karışımının molaritesinden etkilendiğini göstermektedir.

Çizelge 4.3 SEM ve EDX yardımıyla incelenen köpük numunelerin kompozisyonları

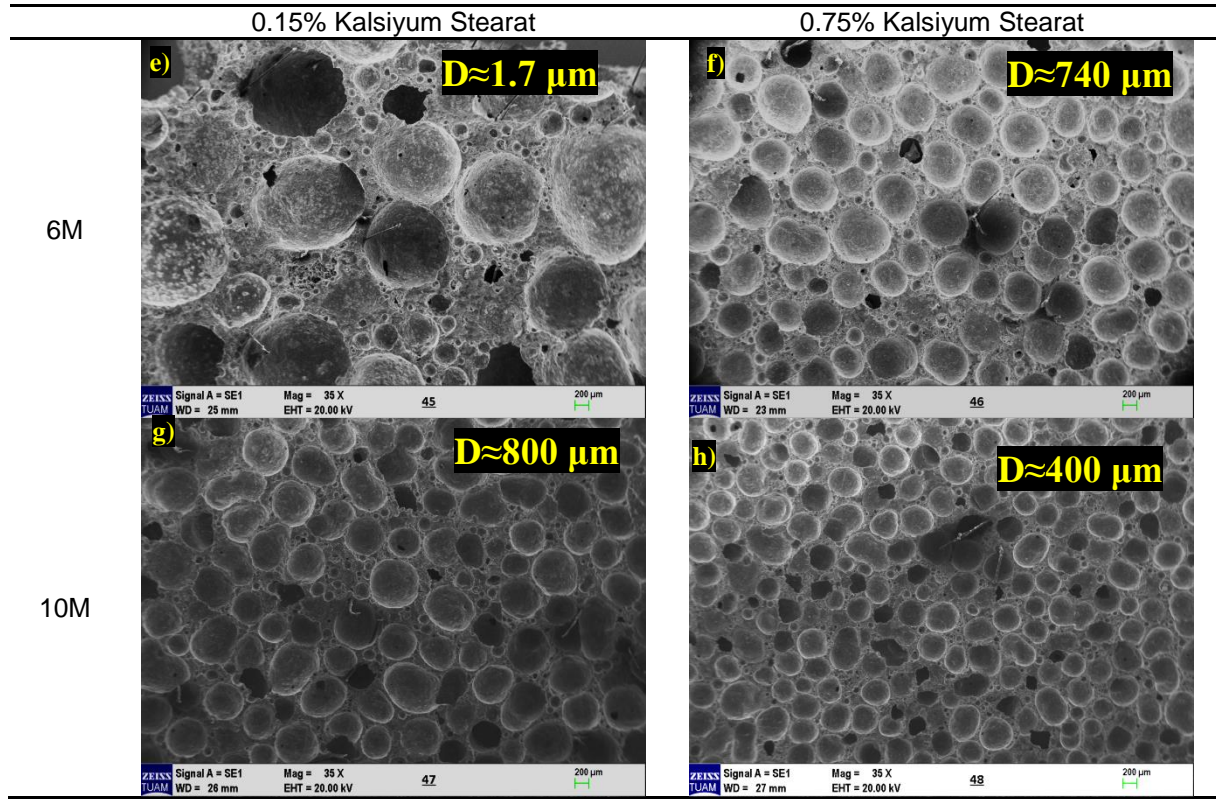
Numune Kodu	Uçucu Kül (%)	Metakaolen (%)	Kalsiyum Stearat (%)	Molarite (M)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml)	Sıcaklık(°C)
a	90	10	0.15	6	1	70
b	90	10	0.75	6	1	70
c	90	10	0.15	10	1	70
d	90	10	0.75	10	1	70
e	90	10	0.15	6	2	70
f	90	10	0.75	6	2	70
g	90	10	0.15	10	2	70
h	90	10	0.75	10	2	70



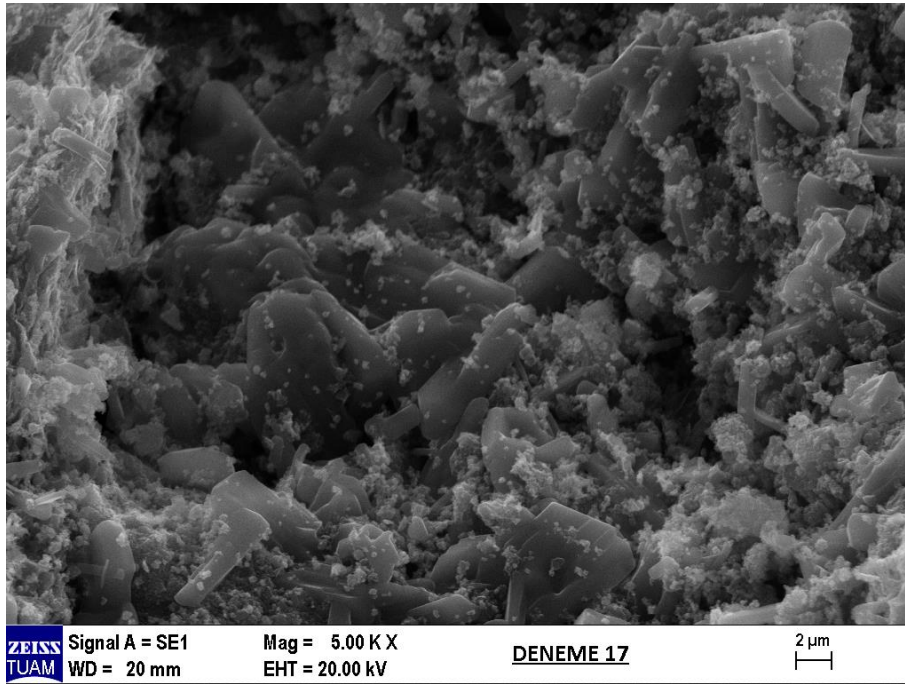
**Şekil 4.13** Değişken kalsiyum stearat içeriği ve molaritesi olan uçucu kül esaslı geopolimer köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. Tüm numuneler köpürtücü ajan olarak % 4  $\text{H}_2\text{O}_2$  içermektedir. D, ortalama gözenek çapını temsil eder.

Şekil 4.15 5000X büyütmedeki geopolimer yapısını göstermektedir. Bu görüntü incelendiğinde reaksiyona girmemiş küresel tanecikli uçucu kül görüntülerine rastlanmamıştır. Bu da uçucu kül taneciklerinin tamamıyla reaksiyona girdiğinin ve tamamıyla geopolimerleşmenin gerçekleştiğinin bir göstergesidir.

Şekil 4.16 yüksek gözenekliliğe sahip olduğu görülen genişletilmiş perlit içeren geopolimerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerini sunmaktadır. Yüksek gözenekliliğe sahip olan perlitin son derece hafif olması ve son üründe eklendiği miktara bağlı olmakla birlikte ciddi yoğunluk düşüşüne sebep olması kaçınılmazdır. Düşük mukavemete sahip olan genişletilmiş perlit içeriğinin karışım içerisinde fazla miktarda bulunması Şekil de görüldüğü üzere gözenekli ve düşük mukavemetli alanların oluşumuna sebep olacağından son ürünün mekanik özelliklerinde bozulmaya sebep olmaktadır. Aynı zamanda yüksek gözenekli olan perlit içeriği, son ürünün su emme miktarını da arttırmakla birlikte donma-çözünme dayanımının düşmesine sebep olmaktadır. Şekil 4.16b’de de görüldüğü üzere perlit-geopolimer ara yüzeyinde de çatlakların oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu çatlakların da mekanik dayanımı olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

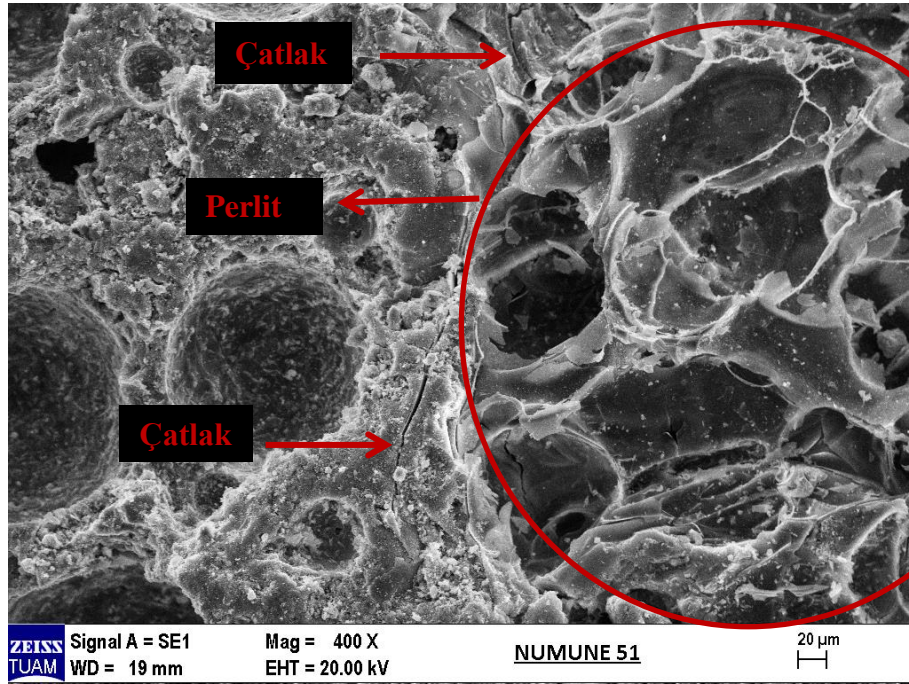
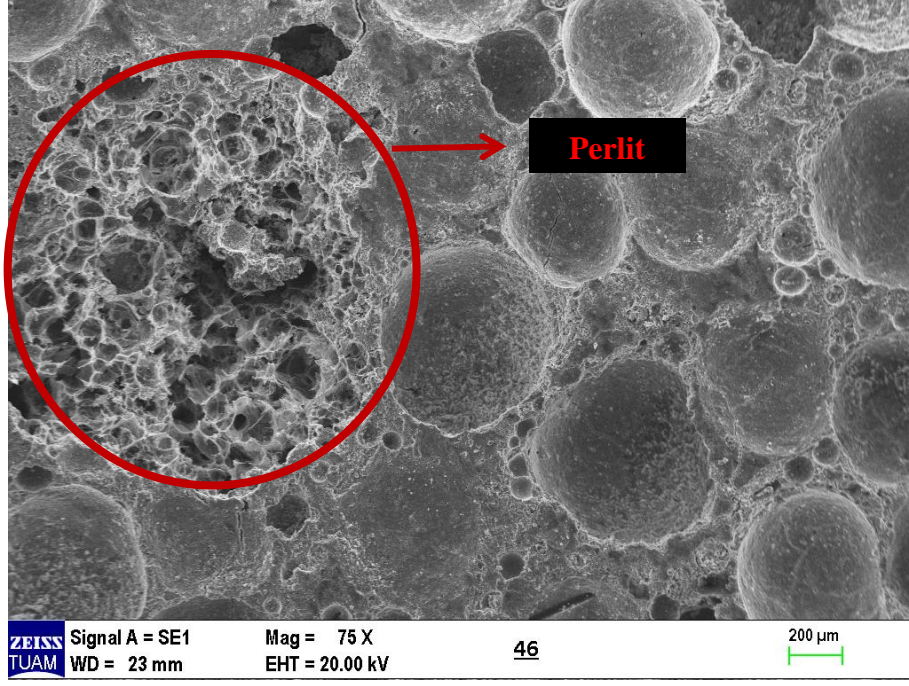


**Şekil 4.14** Değişken kalsiyum stearat içeriği ve molaritesi olan uçucu kül esaslı geopolimer köpüğün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. Tüm numuneler köpürtücü ajan olarak %7 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içermektedir. D, ortalama gözenek çapını temsil eder.



**Şekil 4.15** Geopolimer numunelerin yüksek büyütmedeki görüntüsü.





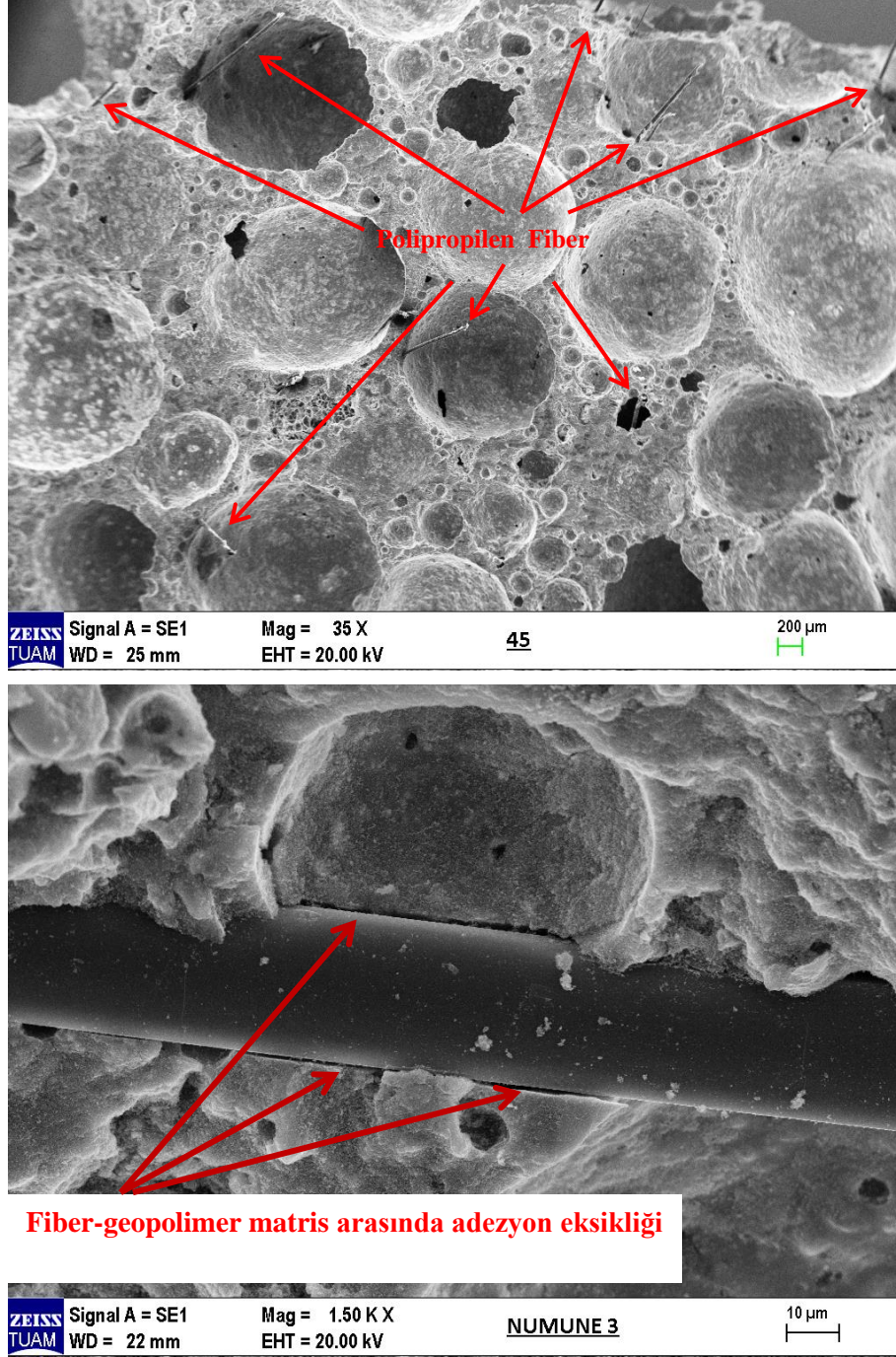
Şekil 4.16 Geopolimer kompozisyonundaki perlit görüntüsü.

Şekil 4.17 geopolimer yapısındaki polipropilen lifin matriks ile etkileşimini göstermektedir. Homojen dağıldığı görülen liflerin, zayıf matriks-lif arayüzeyine sahip olması sebebiyle adezyon eksikliği olduğu görülmektedir. Bu sebeple polipropilen fiber içeriğinin mekanik mukavemeti olumsuz yönde etkilemesi beklenmektedir. Bunun sebebi ise şu şekilde açıklanabilir:

Fiber takviyeli bir kompozit bir bükülme yüküne maruz kaldığında, eğilme momentinin neden olduğu çekme gerilmesi, fiber-matris arayüzünde kayma gerilimine dönüşür ve temas yüzeylerindeki yapışma ve sürtünme yoluyla direnç gösterir. Bu temas kuvveti sadece her iki bileşenin arayüzünü etkilemekle kalmaz, aynı zamanda geopolimer matrisindeki arayüzden uzak alanları da etkiler. Bu nedenle, fiberin ve matrisin ikili hareketi ile fiberi çevreleyen halka şeklinde bir bölge oluşur. Bununla birlikte, bu uygulanan kuvvet fiber-matris arayüzeyinde maksimumdur ve yüzeyden uzaklaştıkça sifıra yaklaşır. Bu durum fiber-matris etkileşimi yüksek olan yapılar için geçerlidir. Bu sayede yüzeye uygulanan yük matrisi homojen olarak dağıtılır. Fakat polipropilen lif ve geopolimer arayüzeyindeki gibi zayıf bağlanmaya sahip olunan durumlarda ise stres dağılımı minimuma inerek hem matris hem de fiberin ayrı ayrı yüke maruz kalmasına ve dayanımının azalmasına sebep olur (Ranjbar vd. 2016).

Birçok çalışma polipropilen gibi hidrofobik yapıya sahip elyafların çimento esaslı bağlayıcılarla ve geopolimerlerle yapışmasını arttırmak için yüzey işleminin potansiyelini araştırmıştır. Bu amaçla, mekanik modifikasyon (örn. Fibrilasyon ve mikro indentasyon), kimyasal işleme yüzey modifikasyonu (örn. Alkali ve silan ile yüzeylere işlem) ve plazma modifikasyonu gibi çeşitli yaklaşımlar uygulanmıştır. Tüm bu yöntemlerde temel prensip, liflerin polar gruplarının yüzey pürüzlülüğünü ve aktivasyonunu arttırmak ve arayüzey oluşumunu sağlamaktır (Ranjbar vd. 2016).

Şekil 4.18 80°C’de kürlenmiş geopolimer köpük numunelerinde gözlemlenen iğnemi yapıları göstermektedir. Tamamen reaksiyona girerek katılmış uçucu kül esaslı geopolimerin elektron mikroskobu, sodyum içerikli alümino-silikat geopolimer fazlarının kristal yapılarının oluşumunu göstermektedir. Bu alkali fazlar sıvri formda ve geopolimere çapraz bağlanmış gibi görünmektedir.

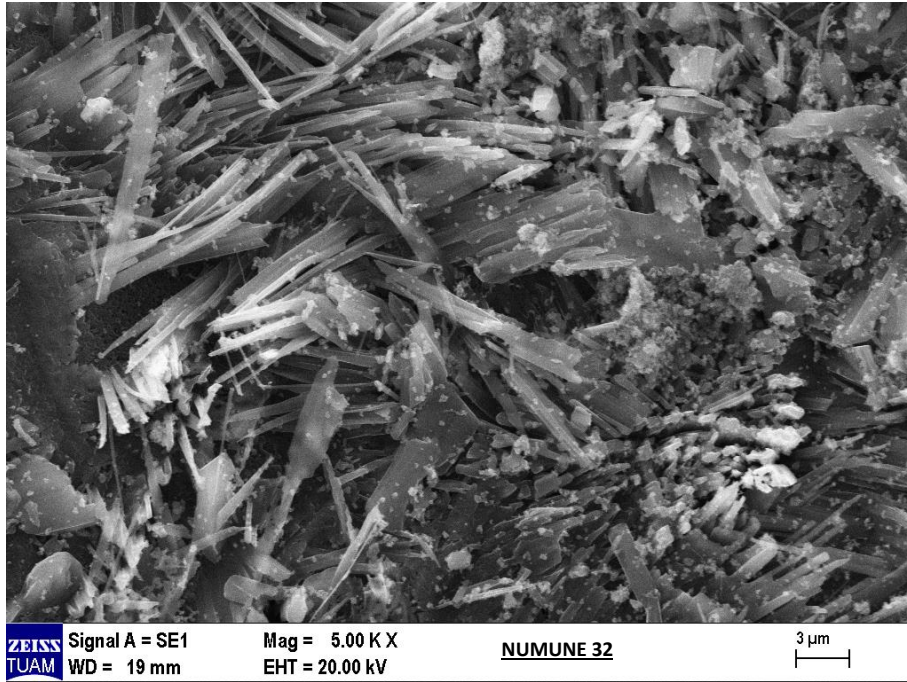
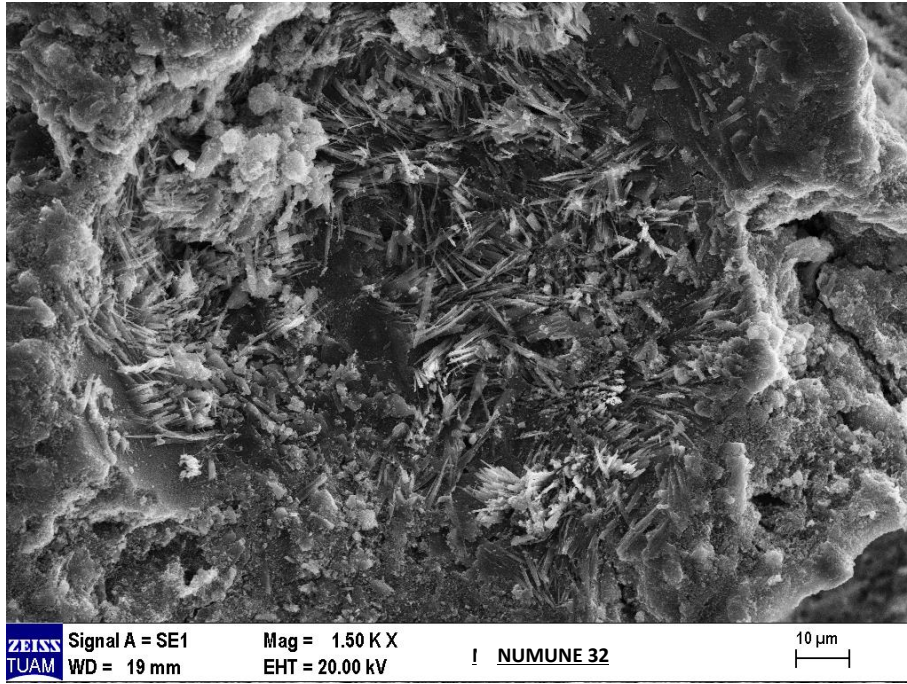


Şekil 4.17 Fiber takviyesinin geopolimer köpük kompozisyonundaki görüntüsü.

Bölüm 4.4.4’de sunulacak olan EDS analiz sonuçlarına göre iğnemsî yapılı kristal fazların sodyum alüminyum silikat geopolimer fazına karşılık gelen Na, Al ve Si gibi elementleri taşıdığını göstermektedir. Bu yapılar sadece 10M’lık alkali çözelti ile hazırlanan ve 80°C’de kürlenmiş karışımlarda gözlemlenmiştir. Az miktarda Fe, Ti, S, Mg, Ca ve K içeren bu sodyum alüminyum silikat yapılarının çoğunlukla lifli iğnemsî (asiküler), uzun yapıda ve geopolimer matrisine çapraz bağlı olduğu Muduli vd.nin (Muduli vd. 2013) yapmış olduğu



çalışma ile de desteklenmektedir. Yapı içerisinde oluşan bu fazların, çözünme ve çökeltme reaksiyonları esnasında amorf halden kristal hale geçtiği belirtilmektedir.

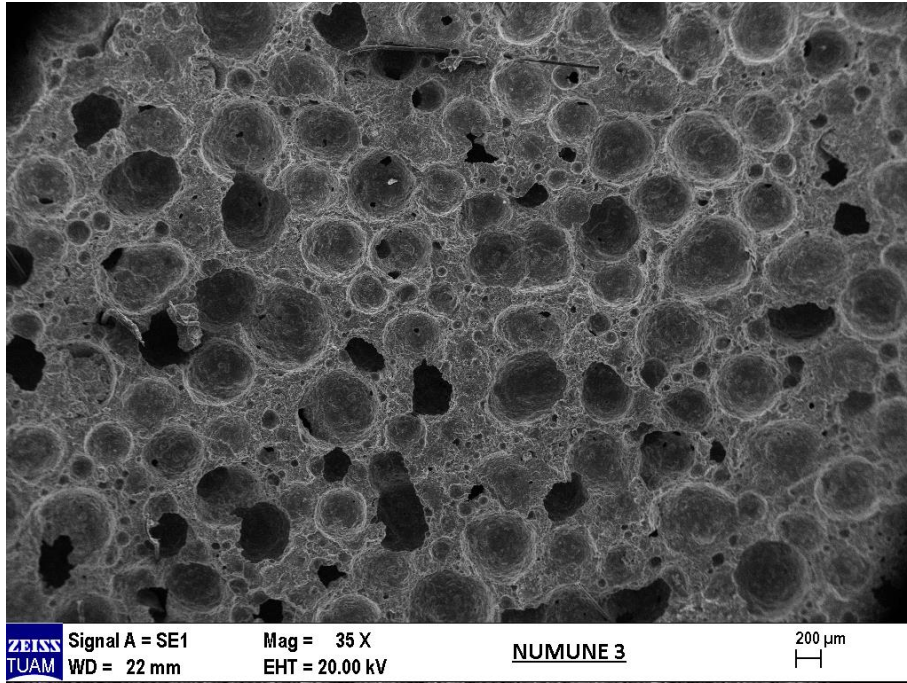
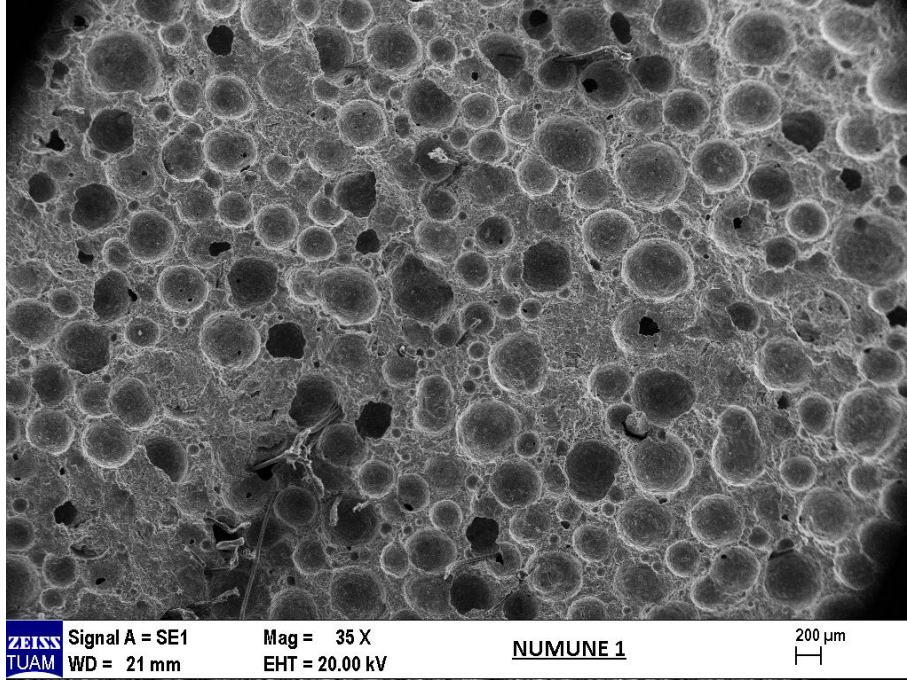


Şekil 4.18 80°C de kürlenen numunelerde oluşan iğnemsî yapıların görüntüsü.

Şekil 4.19’da uçucu kül miktarındaki artışın mikroyapıya ve gözenek yapısına olan etkileri incelenmiştir. Numune 1 %85 oranında uçucu kül ve %15 oranında metakaolen içerirken, Numune 2 %95 oranında uçucu kül ve %5 oranında metakaolen içermektedir. Uçucu kül

miktarındaki artış ile gözenek boyutlarında gözle görülür bir büyüme görülmektedir. Bu durumun uçucu kül ve metakaolenin tane boyutundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu külün tane boyutunun metakaolenden büyük olduğu ölçülmüştü. Dolayısıyla uçucu kül miktarındaki artış, gözenek etrafını saran geopolimer karışımındaki tanecik paketlenmesini olumsuz olarak etkileyerek gözenekler üzerindeki basıncı azalttığı düşünülmektedir. Bu sebeple gözeneklerin büyüme eğilimine girdiği düşünülmektedir. Geopolimer köpük karışımında kullanılan metakaolen miktarının artması ile gözenek boyutlarında incelmeye meydana gelmektedir. Bu durumun numunelerin kuruma büzülmesini de etkilediği düşünülmektedir. Yang vd. (2017) gözenek miktarındaki artışın otojen büzülme ve kuruma büzülmesini arttırdığını bildirmişlerdir. Aynı zamanda gözenek boyutlarındaki küçülmenin yüzeyden su buharlaşmasına engel olduğu ve kuruma büzülmesinin azaldığı yönünde de deneysel ölçümler yapmışlardır. Bunların sonuçları ve çıkarımları literatür ile paraleldir.

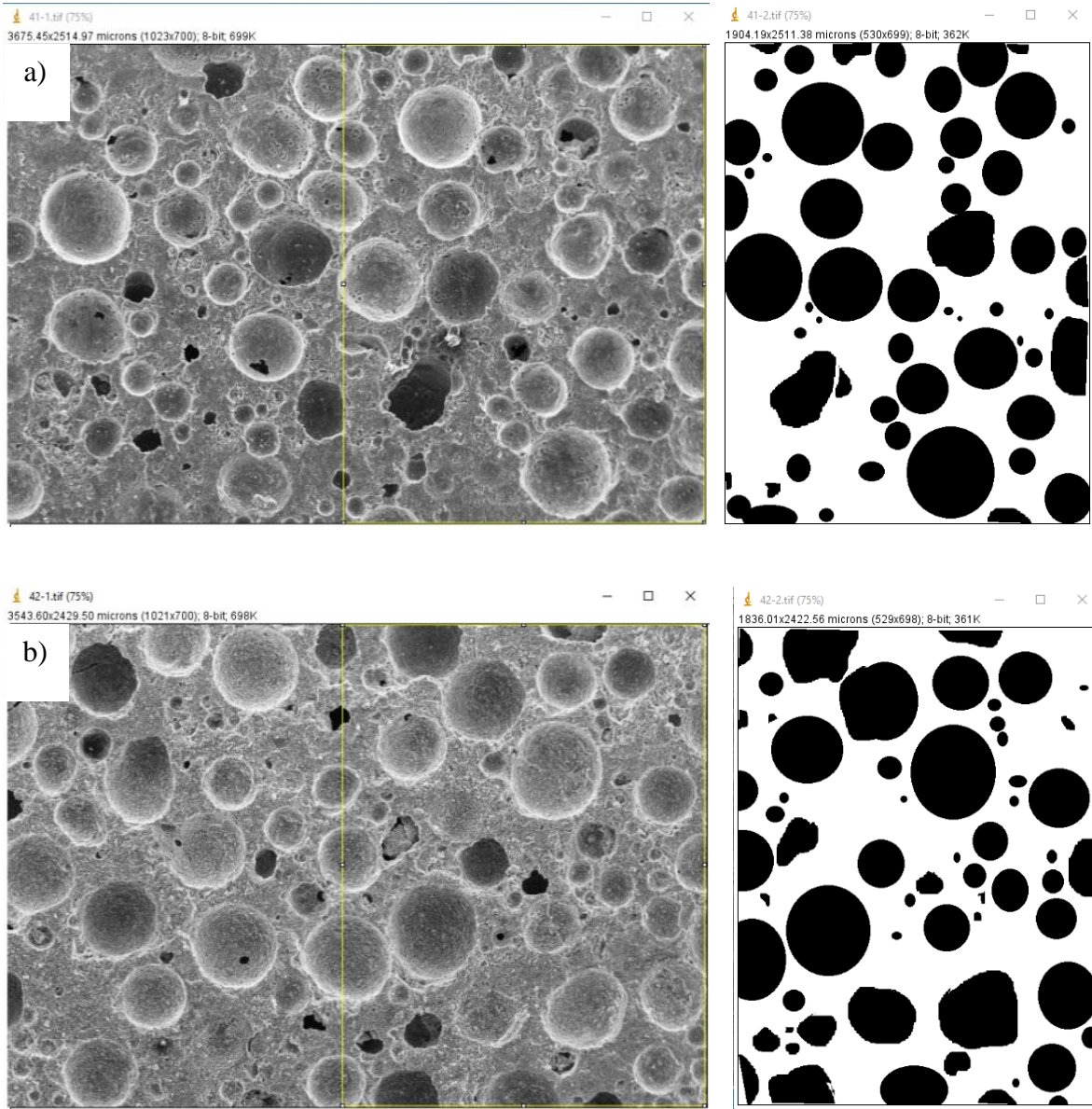




Şekil 4.19 Uçucu kül miktarının mikroyapıya etkisinin incelenmesi.

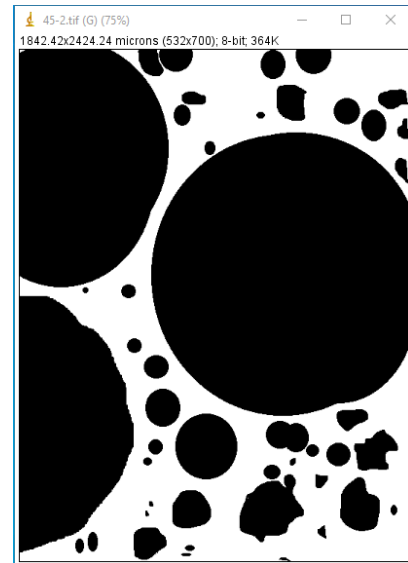
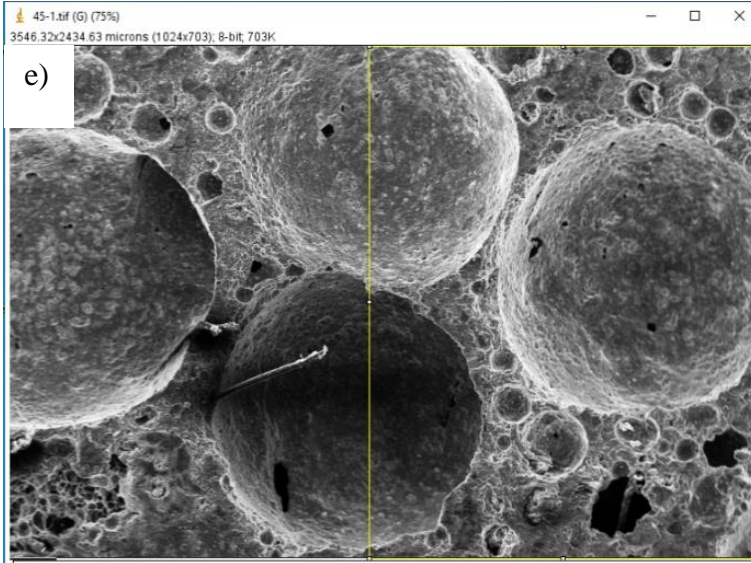
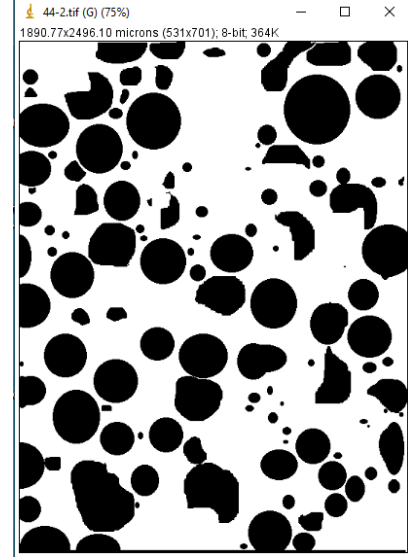
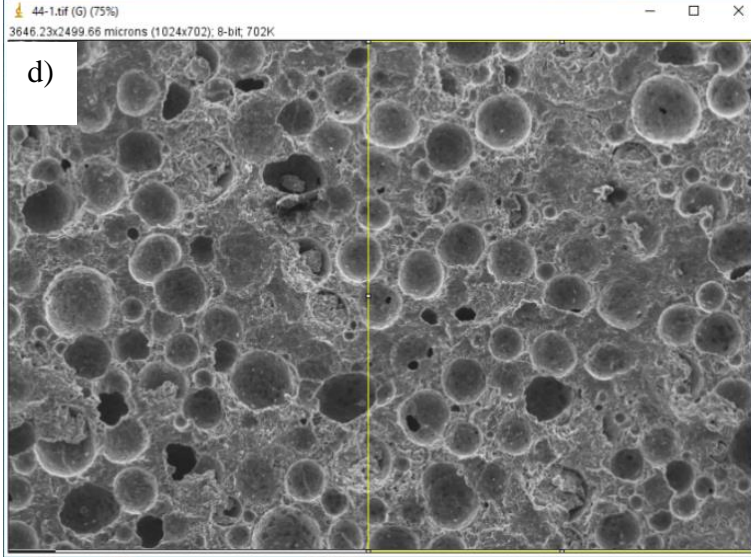
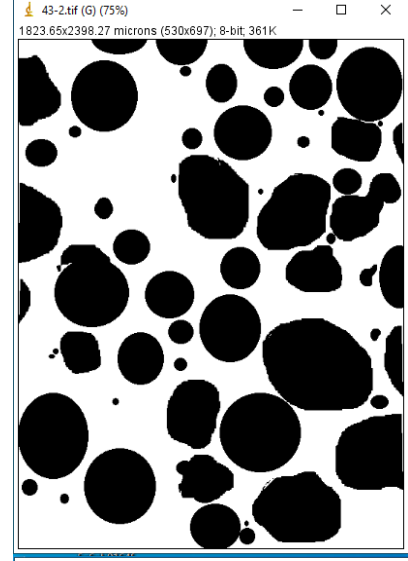
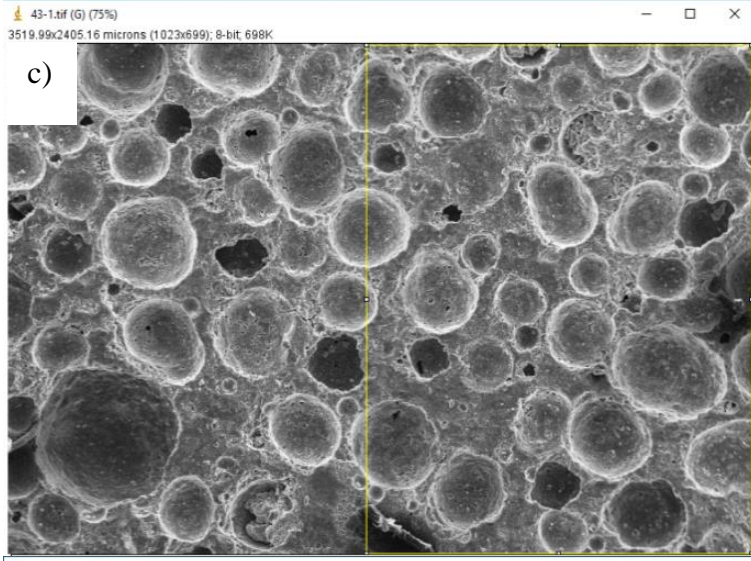
#### 4.4.2 Gözeneklerin Image-J ile Analiz Edilmesi

Taramalı elektron mikroskobundan 75X büyütme değerlerinde görüntüleri alınan numunelerin gözenek büyüklükleri Image-J programı yardımıyla incelenmiştir. İncelenen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve Image-J programı ile elde edilen gözenek görüntüleri Şekil 4.20'de sunulmuştur.

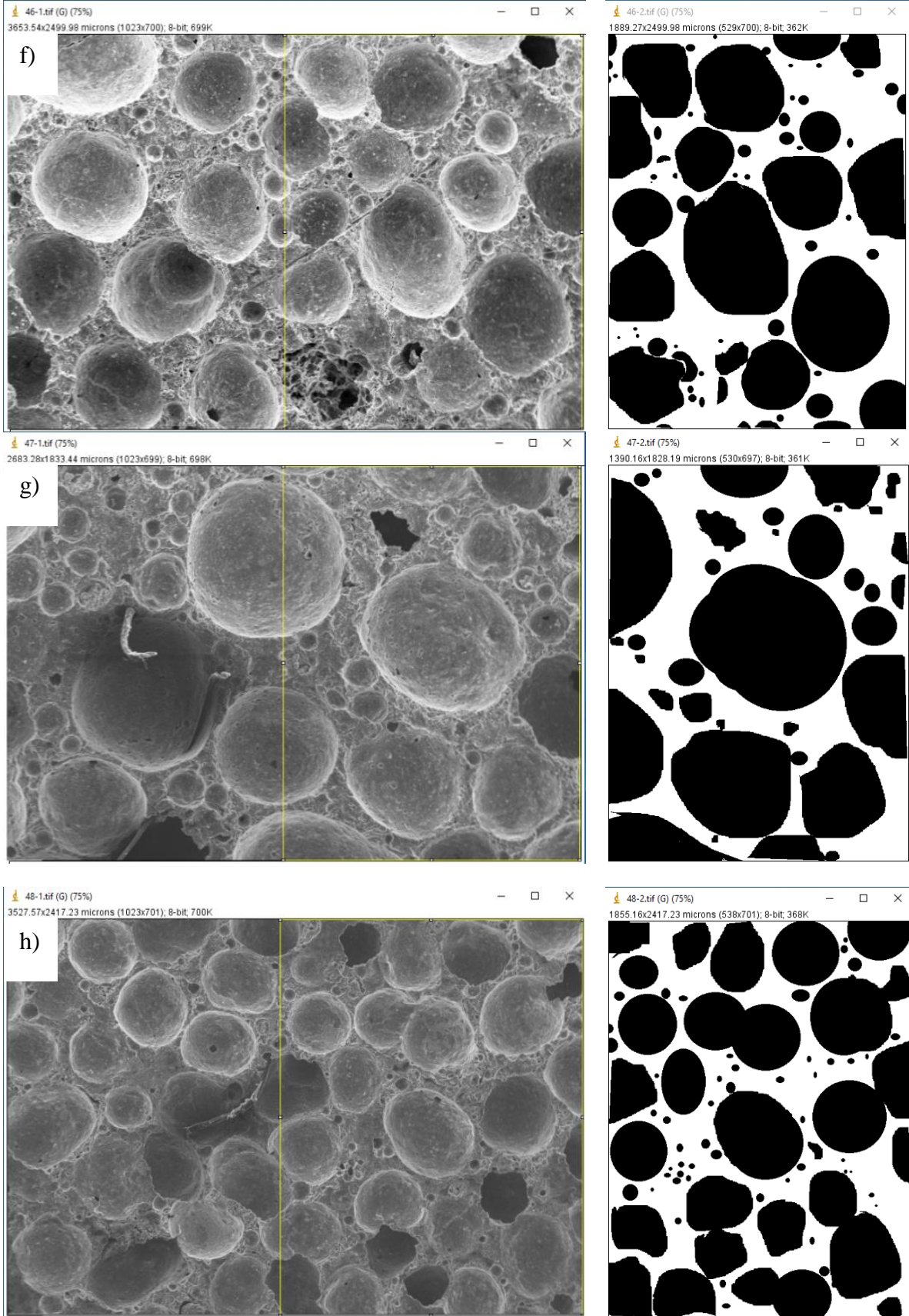


**Şekil 4.20** Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin Image-J programı yardımıyla analiz edilmesi a) Numune 41 b) Numune 42 c) Numune 43 d) Numune 44 e) Numune 45 f) Numune 46 g) Numune 47 h) Numune 48.





**Şekil 4.20 (Devamı)** Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin Image-J programı yardımıyla analiz edilmesi a) Numune 41 b) Numune 42 c) Numune 43 d) Numune 44 e) Numune 45 f) Numune 46 g) Numune 47 h) Numune 48.



**Şekil 4.20 (Devamı)** Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin Image-J programı yardımıyla analiz edilmesi a) Numune 41 b) Numune 42 c) Numune 43 d) Numune 44 e) Numune 45 f) Numune 46 g) Numune 47 h) Numune 48.

Image-J programı yardımıyla gözenek boyutları analiz edilen numunelerin verileri Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Ortalama gözenek boyutları incelendiğinde hidrojen peroksit miktarı, kalsiyum stearat miktarı ve karışım molaritesinin gözenek boyutlarını önemli ölçüde değiştirdiği görülmektedir. Hidrojen peroksit miktarındaki artışa bağlı olarak hücre boyutlarında büyümelere sebep olmakla birlikte yeni hücre oluşumlarını sağlamıştır. Molaritedeki ve kalsiyum stearat miktarındaki artışlar ise gözenek boyutlarının küçülmesini sağlamış ve yeni küçük gözeneklerin oluşumunda da etkili olmuştur.

**Çizelge 4.4** Image-J ile incelenen numunelerin gözenek boyutu verileri.

Numune Kodu	Uçucu Kül (%)	Metakaolen (%)	Kalsiyum Stearat (%)	Molarite (M)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	Gözenek Boyutları (µm)
41	90	10	0.15	6	1	159.20
43	90	10	0.75	6	1	153.84
45	90	10	0.15	6	2	266.25
47	90	10	0.75	6	2	193.63
42	90	10	0.15	10	1	147.20
44	90	10	0.75	10	1	116.90
46	90	10	0.15	10	2	252.89
48	90	10	0.75	10	2	143.47

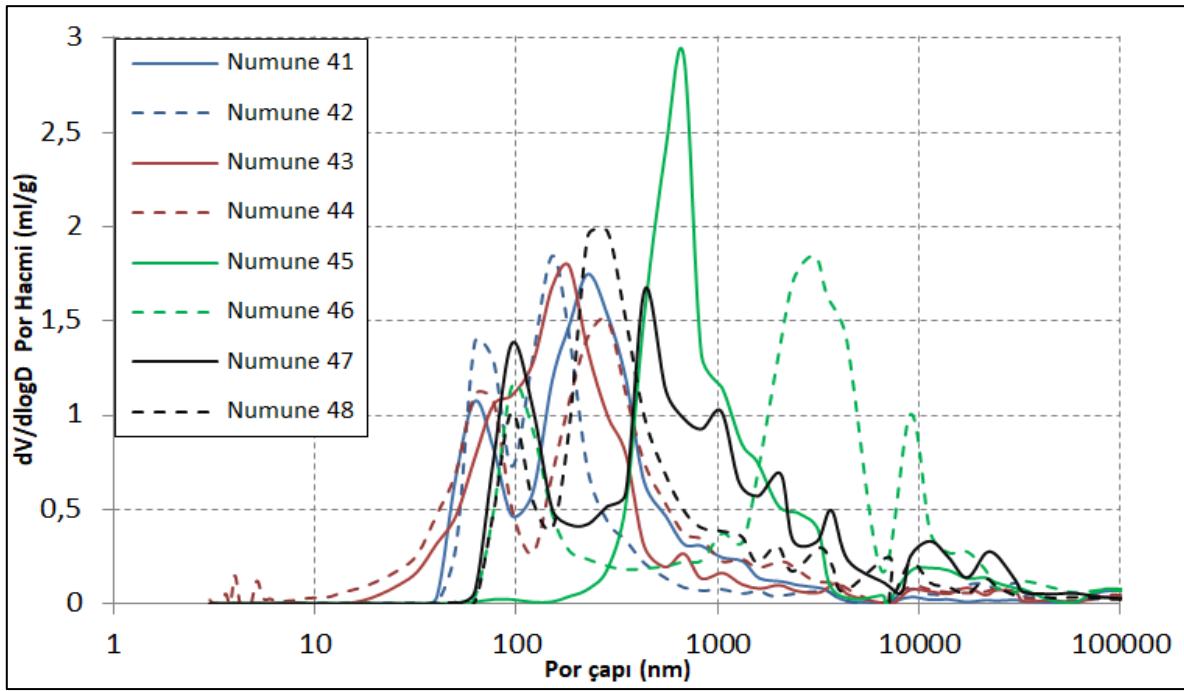
#### 4.4.3 Gözeneklerin Civa Porozimetresi ile Analizi

Civa porozimetresi ile gözenek dağılımları incelenen uçucu kül esaslı köpük numunelerin numunelere ait bilgiler Çizelge 4.5'de ve bu numunelerin (dV/dlogD) gözenek boyut dağılımı Şekil 4.21'de sunulmuştur. Eğriler genel anlamda bimodal gözenek dağılımı göstermekle birlikte gözenek boyutları >50nm'de tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.5** Civa porozimetresi ile gözenek analizi yapılan numune reçetelerine ilişkin bilgiler.

Numune Kodu	Uçucu Kül (%)	Metakaolen (%)	Kalsiyum Stearat (%)	Molarite (M)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml)	Kürlenme Sıcaklığı (°C)
41	90	10	0.15	6	1	70
43	90	10	0.75	6	1	70
45	90	10	0.15	6	2	70
47	90	10	0.75	6	2	70
42	90	10	0.15	10	1	70
44	90	10	0.75	10	1	70
46	90	10	0.15	10	2	70
48	90	10	0.75	10	2	70

Sunulan analiz grafiğinde aynı renkler benzer reçeteleri göstermekle birlikte düz çizgiler 6M'lık karışımın ve kesikli çizgiler ise 10M'lık karışımların analizlerini göstermektedir. Her iki molaritede hazırlanan köpük geopolimerlerde >50nm büyüklüğünde yani makro büyüklükte gözeneklerin olduğu anlaşılmıştır. Ancak örneklerin vermiş olduğu civa porozimetresi ölçüm sonuçları dikkatli incelendiğinde, 10M alkali çözeltisi ile hazırlanan numunelerin ortalama gözenek boyutlarının, 6M alkali çözeltisi ile hazırlanan köpük örneklerine kıyasla daha küçük boyutlarda olduğu görülmüştür (Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).



Şekil 4.21 Köpük geopolimer örneklerinin gözenek boyutu dağılımı.

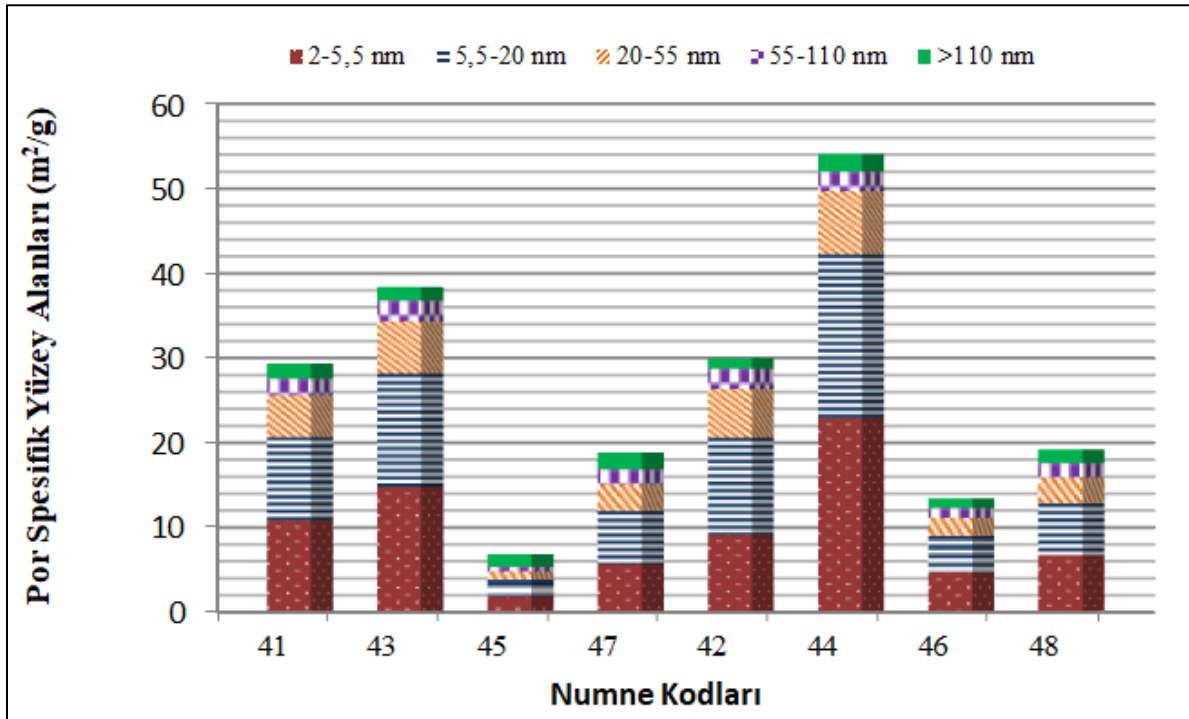
Civa porozimetresi ölçümlerinden numuneler ile ilgili toplam gözenek alanı, gözeneklilik miktarı, numunelerin ölçülen yoğunlukları ve ortalama gözenek boyutu ile ilgili ayrıntılı bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 4.6'da sunulmuştur.



**Çizelge 4.6** Civa porozimetrisi ile ölçülen köpük geopolimerlerinin gözenek özellikleri.

Numune Kodları	Toplam Alan (m <sup>2</sup> /g)	Gözeneklilik (%)	Bulk Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ortalama Gözenek Boyutu (nm)
41	29.34	78.07	0.55	179.9
42	29.98	79.88	0.51	139.1
43	38.40	84.48	0.39	815.0
44	54.09	85.55	0.36	330.6
45	6.83	76.77	0.59	142.2
46	13.43	76.69	0.58	104.3
47	18.83	82.99	0.43	507.2
48	19.22	83.26	0.42	288.4

Civa porozimetresi ölçümleri sonucunda elde edilen bilgiler ışığında köpük geopolimerlerdeki gözeneklerin spesifik yüzey alanlarına ilişkin veriler Şekil 4.22’de sunulmuştur. Bu bilgilere göre karışım alkalinitesinin artması gözeneklerin kapladığı yüzey alanını arttırmıştır. Buna ek olarak karışım alkalinitesinin artması daha çok mikro ve mezo gözeneklerin miktarında değişiklik yaratmıştır. Makro boyutlu gözenek boyut miktarında fark edilmiş değişiklikler gözlemlenmemiştir.



**Şekil 4.22** Civa porozimetresi ile ölçülen köpük geopolimer numunelerinin gözenek spesifik yüzey alan verileri.

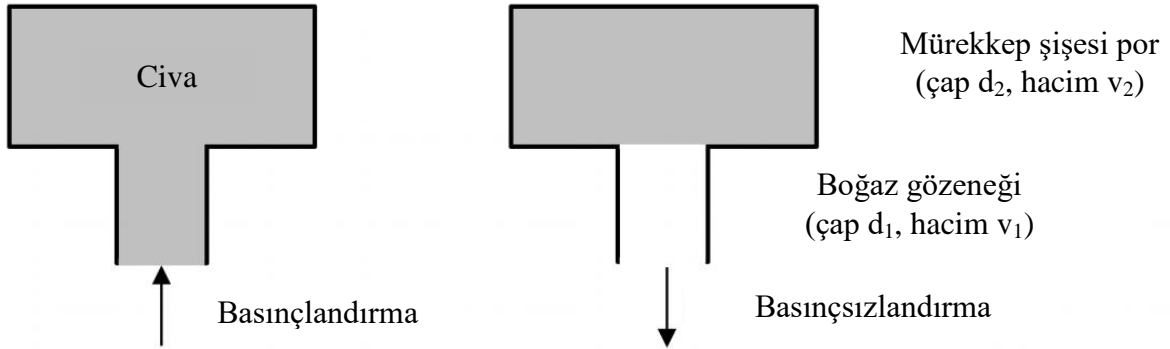
Civa porozimetresinde elde edilen gözenek boyutu bilgileri, taramalı elektron mikroskobundan alınan görüntülerin Image-J programı ile analiz edilmesi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada gözenek boyutlarının civa porozimetresi ile doğru ölçülemediği saptanmıştır. Literatürde civa porozimetresinin kolay ve yaygın bir yöntem olduğu, gözenekli geopolimerlerde ve çimento esaslı malzemelerde doğru ölçümler verdiği ile ilgili yapılan çalışmalar bulunsa da (Galle 2001), karşıt görüşlü çalışmalar da bulunmaktadır (Abell vd. 1999). Abell. vd civa porozimetresi ile yaptıkları ölçümlerde maksimum gözenek boyutunun  $0.005\mu\text{m}$  olduğunu analiz etmişlerdir. Aynı numunelerin mikroskop altındaki görüntülerinde ise gözeneklerin  $0.02-50\mu\text{m}$  arasında olduğunu farketmişlerdir. Yapılmış olunan bu tez çalışmasında da civa porozimetresinin gözenek boyutlarının yanlış ölçüldüğü konusunda görüşe varılmıştır. Civa porozimetresinde  $80-50000\text{nm}$  ( $0.08-50\mu$ ) arasında tespit edilen gözenek boyutlarının gerçekte  $116-266\mu\text{m}$  arasında değiştiği saptanmıştır. Dolayısıyla geopolimer köpük numunelerin gözeneklerinin analizinde sadece taramalı elektron mikroskobu ya da sadece civa porozimetresi kullanmak, gözenekler ile ilgili bütünü görmemize engel olmaktadır. Bu sebeple her iki analizin birlikte kullanılması tamamlayıcı olacak ve daha detaylı bir biçimde gözenek yapısı hakkında bilgi edinilmesini sağlayacaktır.

Civa porozimetresinin kapalı gözenek yapısı, açık gözenek yapısı, ağ şeklinde bağlantılı gözenek yapısı, mürekkep şişesi yapısı gibi yapıların bu yöntem için sınırlayıcı olduğu bilinmektedir. Özellikle mürekkep şişesi gözeneklerin bu tür ölçüm yanlışlarına sebep oldukları bilinmektedir. Mürekkep şişesi şeklindeki gözenekler birbirine bir boğaz aracılığıyla bağlıdır. Esas gözeneğe açılan boğaz yani giriş açıklığı gerçek boşluktan çok daha küçük olmakla birlikte civa porozimetresi ölçüm yönteminde basınç, boğaz açıklığına göre belirlenerek esas gözeneği dolduracaktır. Bu da esas gözeneğin değil giriş boşluğundaki açıklığın boyutunun ölçülmesini sağlayacaktır. Bu teorinin doğruluğu ise gözeneklere infiltre edilen bilinen civa miktarının işlem sonrası civa miktarı ile kolaylıkla anlaşılmaktadır (Giesche 2006).

Şekil 4.23’de sunulduğu üzere basınçlandırma durumunda civa, gerçek boşluk boyutu yerine açıcı boyun girişiyle belirlenen basınçta bir gözenek boşluğuna girer. Gözenek boynu, boğaz gözeneği olarak belirtilir. Zorla girme basıncı, boğaz gözeneğini (çap  $d_1$ ) dolduran civayı zorladığında, iç geniş boyutlu gözenek de (çap  $d_2$ ) aynı anda doldurulacaktır. İçteki geniş gözenek, mürekkep şişesi gözeneği olarak adlandırılmaktadır. Basıncısızlaştırma sırasında, boğaz gözeneğindeki  $d_1$  civa serbestçe ekstrüde edilebilirken, iç mürekkep şişesi gözeneğinin

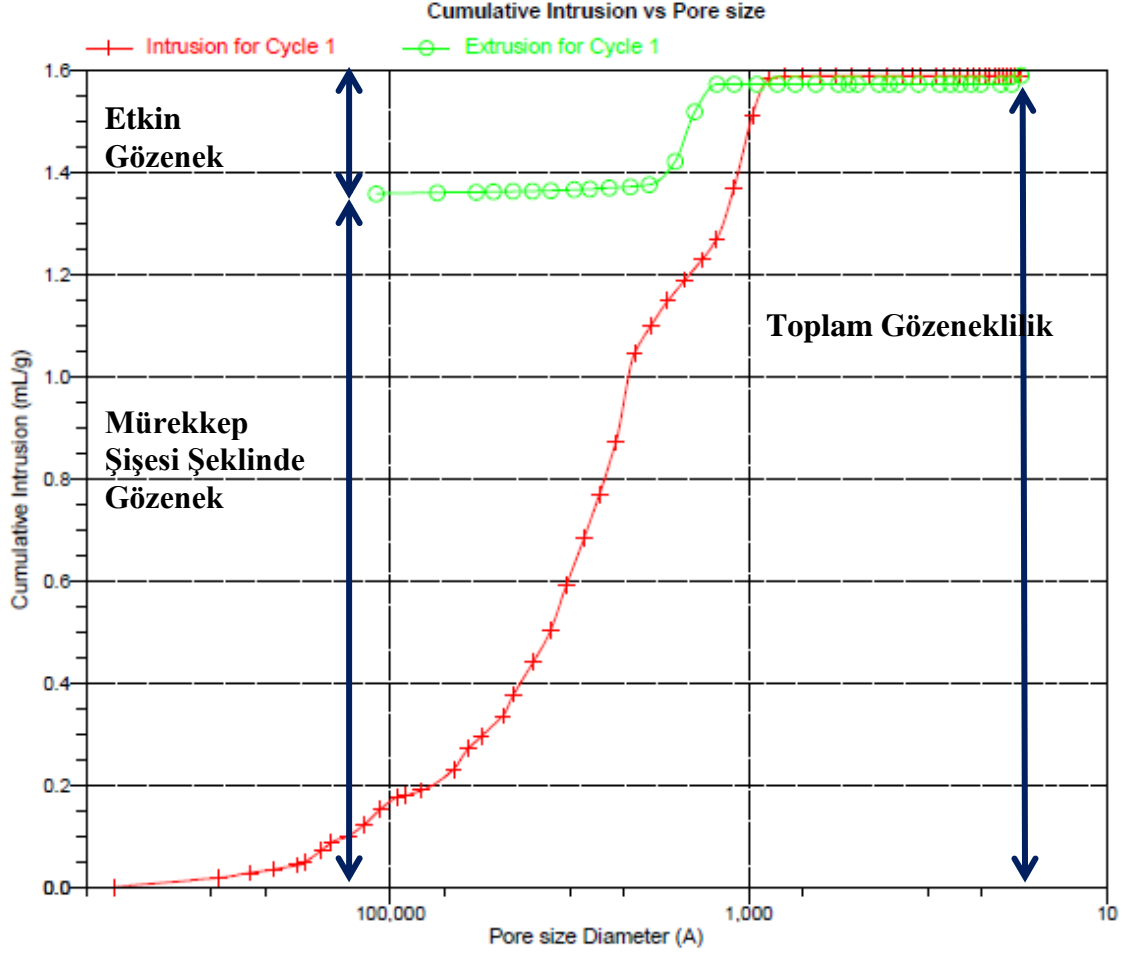


$d_2$  geniş gövdesindeki cıva boğaz gözeneginden ekstrüde edilemez.



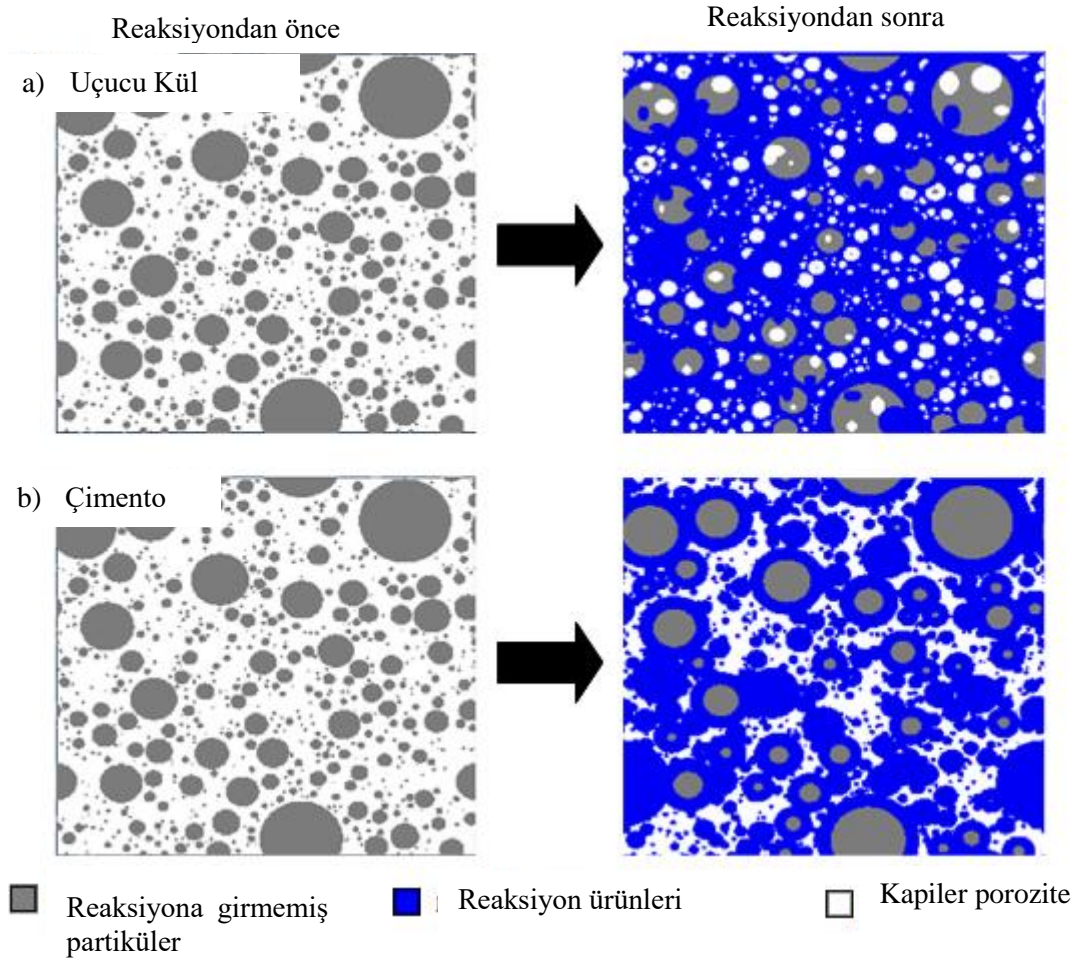
**Şekil 4.23** Mürekkep şişesi gözeneğini bağlayan boğaz gözenekli bir gözenek sisteminde cıva basınçlandırma-basınçsızlaştırma histerizisi.

Lowell ve Shields tüm gözenekli numunelerin cıva porozimetresi analizlerinde uygulanan basınç miktarından bağımsız olarak farklı şekillerde histerizis gösterdiğini söylemişlerdir. Eğer histerizis mürekkep şekli gözeneklerden kaynaklanıyorsa, tek çeşit histerizis olduğunu söylemişlerdir (Lowell ve Shields 1991). Diamond etkin gözenek, toplam gözenek ve mürekkep şişesi şeklindeki gözenek terimlerini tanımlamıştır (Diamond 1971). Şekil 4.24'te sunulan cıva porozimetresi analiz sonucuna benzer histerizis tüm numunelerde görülmüştür. Bu da tüm numunelerde mürekkep şişesi por çeşitinin olduğunu göstergesidir.



Şekil 4.24 Civa porozimetresi basınçlandırma-basınçsızlaştırma sırasında gözlemlenen histerizis.

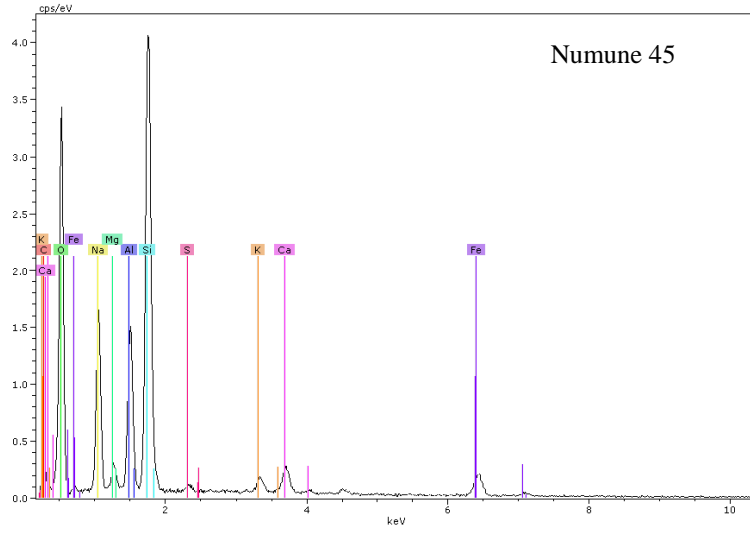
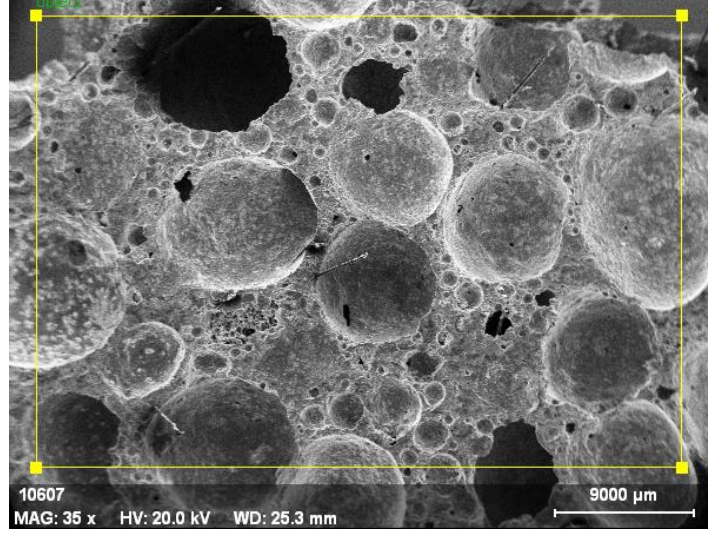
Uçucu kül esaslı geopolimerlerde oluşan %50 ila 80 miktarındaki mürekkep şişesi şeklinde gözeneklerin köpürme reaksiyonundan bağımsız olarak yaklaşık %46'sının geopolimerizasyon reaksiyonundan kaynaklandığını söyleyen bir görüş bulunmaktadır (Ma vd. 2013, Masi vd. 2014). Bu kadar fazla miktarda oluşan "mürekkep şişesi" gözeneklerin kısmen köpük oluşumuna, büyük ölçüde ise geopolimerizasyon sırasında oluşan kılcal (kapiler) gözeneklere bağlanmaktadır. Yüksek miktarda silis içeriğine sahip uçucu kül esaslı geopolimer numunelerinde, jelleşme sonrasında uçucu kül yüzeyinde oluşan çekilmelerin bu tür kapiler boşluklara neden olduğu söylenmektedir. Şekil 4.25'te sunulan, oluşan boşlukların alüminosilikat jel tarafından çevrelenmiş, civa porozimetresi analizinde tespit edilen 0.1-1µm arasında oluşan geniş gözenekler olduğu belirtilmektedir (Lloyd vd. 2009). Çimento sistemlerinde, hiç silis içeriği olmayan ya da düşük miktarda silis içeren, jel fazı oluşumu düşük geopolimerlerde ise reaksiyon ürünü uçucu kül etrafında büyümekle birlikte çimento hamuruna benzer kılcal gözenek sistemi oluşmaktadır.



**Şekil 4.25** Mikroyapı oluşumu: (a) Yüksek silika içeriği ile aktifleştirilmiş uçucu kül esaslı geopolimer; (b) düşük silika içeriğine sahip veya hiç silika içermeyen uçucu kül esaslı geopolimer ya da çimento.

#### 4.4.4 EDS Analizi

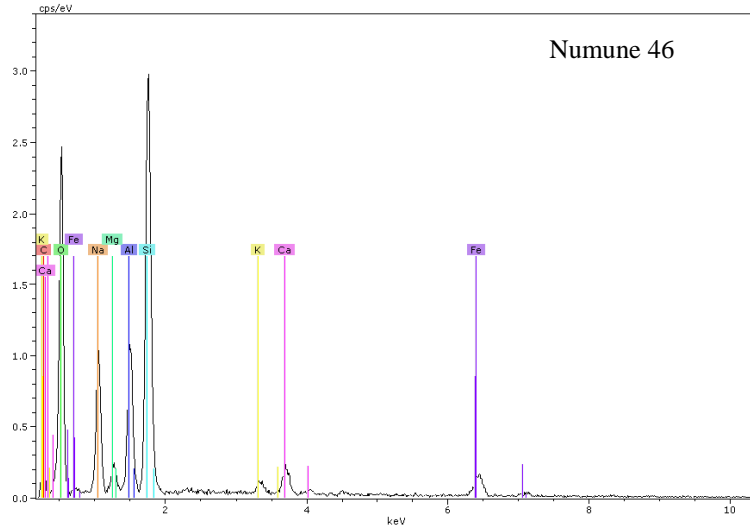
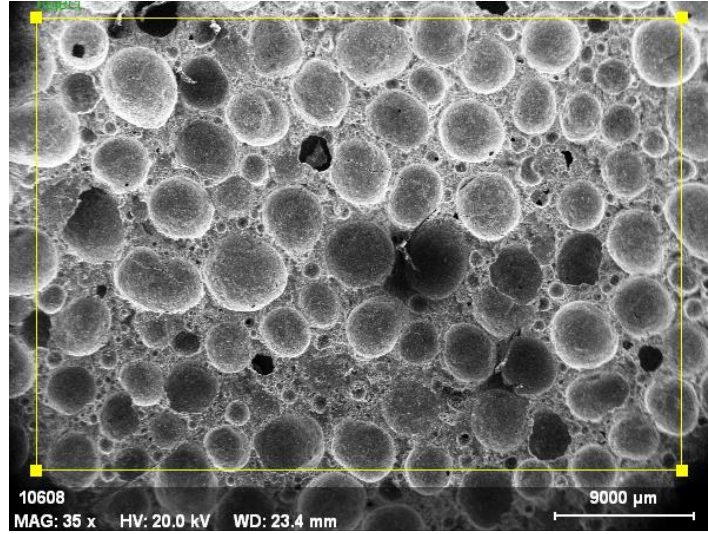
SEM ile elde edilen görüntüler EDS yardımıyla da incelenmiş numunelerin yüzeylerinden elde edilen yarı kantitatif bilgiler ışığında yorumla yapılmaya çalışılmıştır. Numunede yer alan ana elemanların O, Si, Al, Na ve minör olarak K, Fe, Ca ve Mg elementlerinin varlığı geopolimerlerin EDS spektrumlarında görülmektedir (Şekil 4.26).



Oksitler	Spektrum
CO <sub>2</sub>	4.75
Na <sub>2</sub> O	17.74
Mg	1.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.42
SiO <sub>2</sub>	50.07
SO <sub>3</sub>	0.75
K <sub>2</sub> O	1.14
CaO	2.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.95

a)

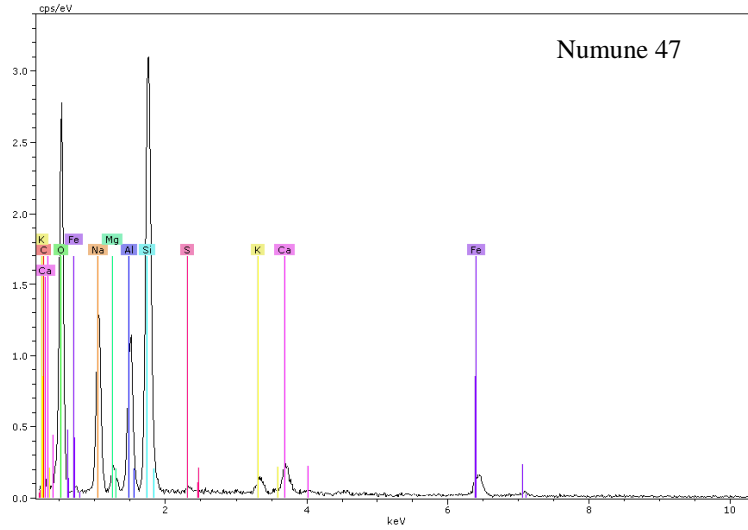
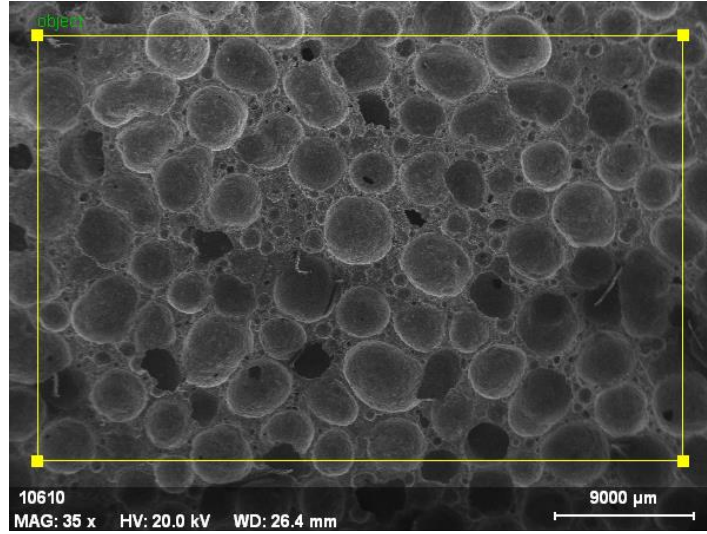
Şekil 4.26. Köpük numunelerin EDX yardımıyla incelenmesi. a)Numune 45, b)Numune 47, c)Numune 46, d)Numune 48.



Oksitler	Spektrum
CO <sub>2</sub>	0.02
Na <sub>2</sub> O	19.65
Mg	1.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.20
SiO <sub>2</sub>	52.01
SO <sub>3</sub>	0.81
K <sub>2</sub> O	1.17
CaO	2.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.74

b)

Şekil 4.26 (Devamı) Köpük numunelerin EDX yardımıyla incelenmesi. a) Numune 45, b) Numune 47, c) Numune 46, d) Numune 48.

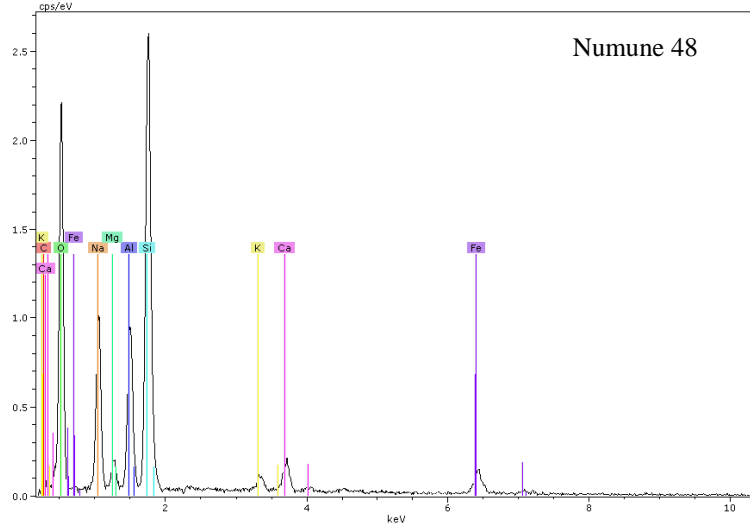
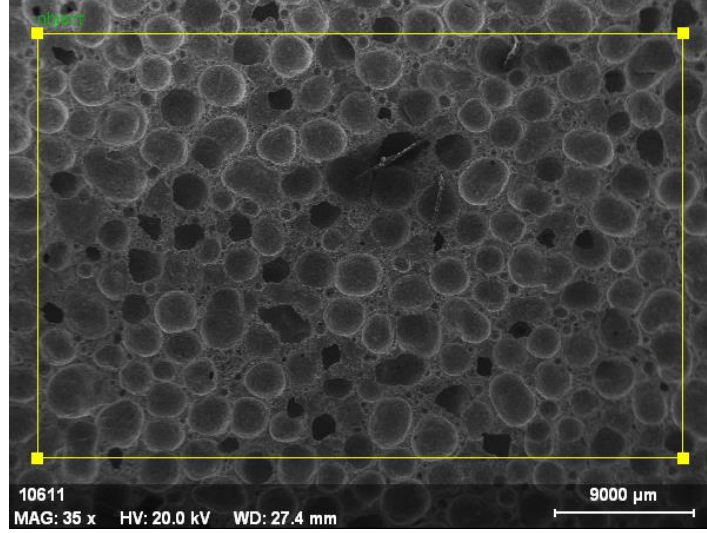


Oksitler	Spektrum
CO <sub>2</sub>	0.65
Na <sub>2</sub> O	17.25
Mg	1.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.87
SiO <sub>2</sub>	52.27
K <sub>2</sub> O	1.05
CaO	3.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.73

c)

Şekil 4.26 (Devamı) Köpük numunelerin EDX yardımıyla incelenmesi. a)Numune 45, b)Numune 47, c)Numune 46, d)Numune 48.





Oksitler	Spektrum
CO <sub>2</sub>	3.11
Na <sub>2</sub> O	18.41
Mg	1.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.26
SiO <sub>2</sub>	49.58
K <sub>2</sub> O	1.29
CaO	3.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.47

d)

Şekil 4.26 (Devamı) Köpük numunelerin EDX yardımıyla incelenmesi. a)Numune 45, b)Numune 47, c)Numune 46, d)Numune 48.

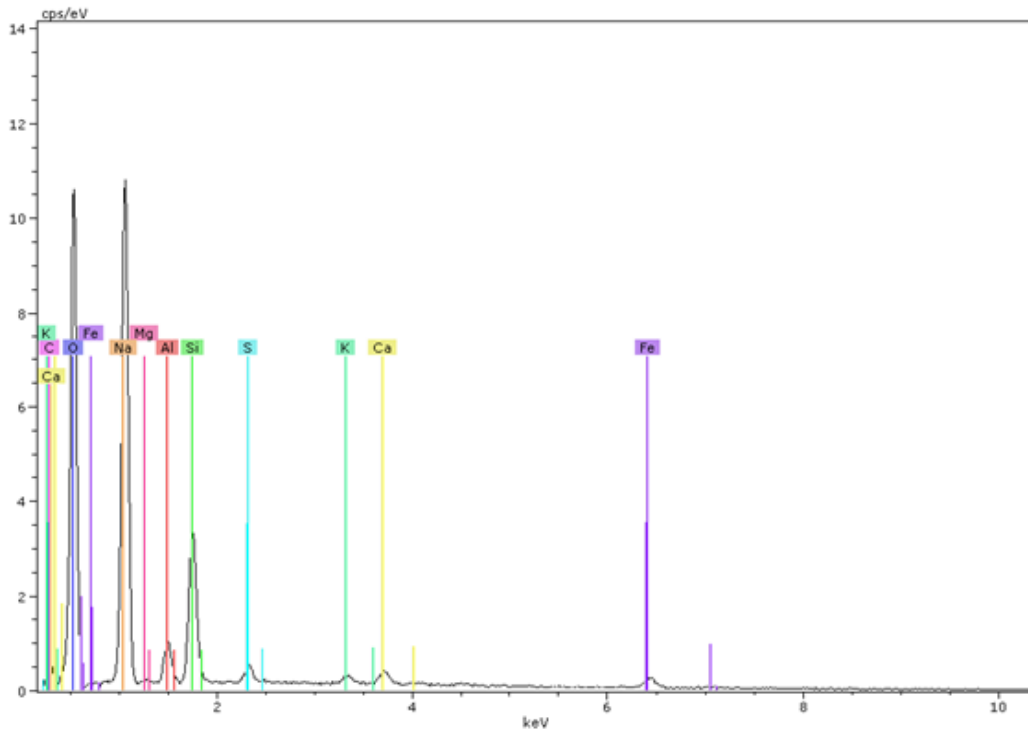
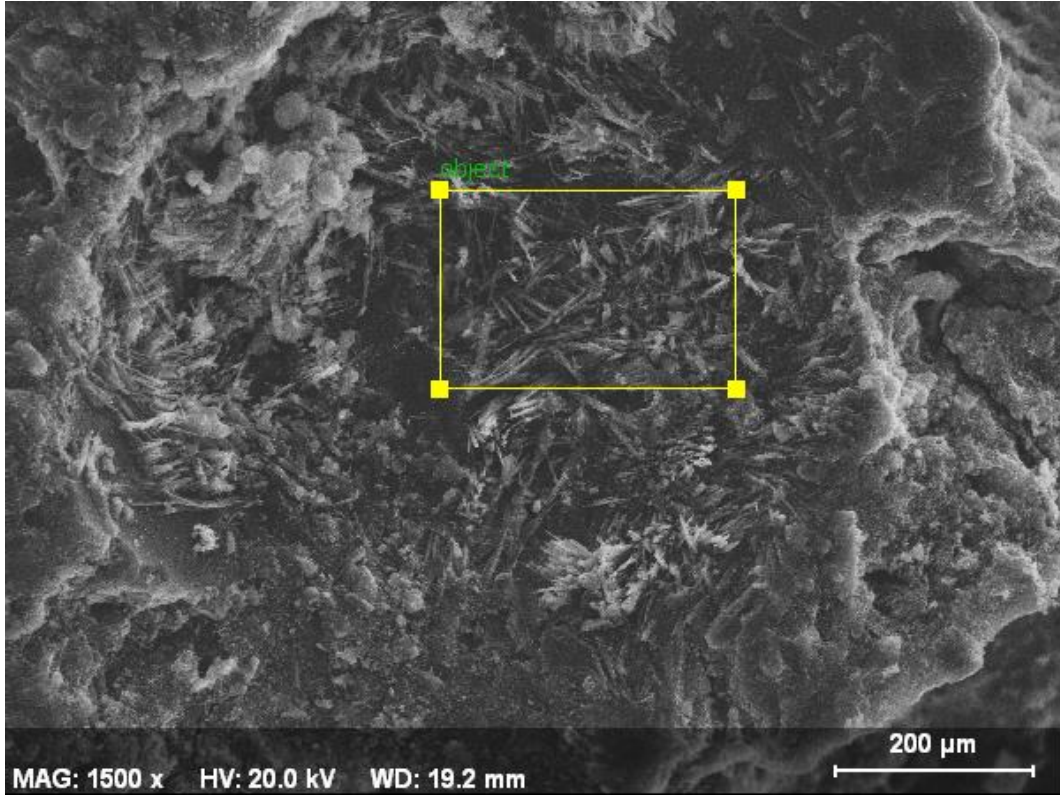
Çizelge 4.7, EDS analizi ile elde edilen geopolimer bileşimlerini göstermektedir. Eşit miktarda uçucu kül ve metakaolen ile hazırlanan köpük numunelerin  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları benzer olarak analiz edilmiştir. Bu sebeple mukavemetlerdeki farklılıkların  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranından bağımsız, oluşan gözenek miktarı ve gözenek boyutları ile doğrudan bağlantılı olduğu görülmektedir. Molarite farklılıkları sebebiyle Numune (45-46) ve Numune (47-48) arasında  $\text{Na}_2\text{O}$  oranlarında farklılıklar gözlemlenmiştir. kalsiyum stearat miktarının artışı ile kalsiyumlu bileşiğin ağırlıkça % değerlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Yüksek miktarda bulunan demir bileşiğinin uçucu külden geldiği düşünülmektedir.

**Çizelge 4.7** Uçucu kül esaslı köpük numunelerin kompozisyonlarının EDX yardımıyla analiz edilmesi.

Oksit olarak element (ağırlıkça%)	Numune 45 (a)	Numune 47 (b)	Numune 46 (c)	Numune 48 (d)
$\text{SiO}_2$	50.07	52.27	52.01	49.58
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.42	16.87	16.20	16.26
$\text{Na}_2\text{O}$	17.74	17.25	19.65	18.41
$\text{CaO}$	2.45	3.31	2.59	3.10
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.95	6.73	5.74	6.47

Bölüm 4.4.1’ ve Şekil 4.18 ‘de bahsedilen Numune 30 ve 32’de karşılaşılan iğnemsî yapıların EDS analizini sunmaktadır (Şekil 4.27). Oluşan yapıların içerikleri Çizelge 4.8’de sunulmaktadır. Çizelgede sunulduğu üzere analiz edilen bölgede sodyum içeriği oldukça yüksek oranda olmakla birlikte silisyum ve alüminyum içeriklerinin de yüksek olduğu görülmektedir. Buna ek olarak Fe, Mg, S gibi içerikler de az miktarda bulunmaktadır. Eser miktarda bulunan Fe, Mg, S gibi içeriklerin iğnemsî şekillerin oluşmasında etkili olduğu Muduli vd. (2013) tarafından belirtilmiştir.





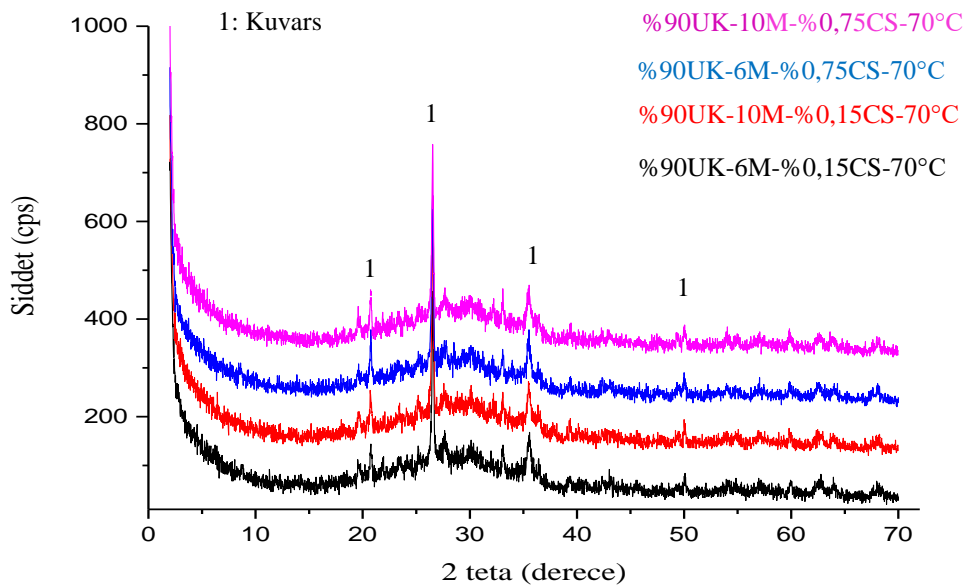
Şekil 4.27 Numune 32'nin taramalı elektron mikroskopunda görülen iğnemi yapılarının EDS analizi.

**Çizelge 4.8** Taramalı elektron mikroskobunda gözlemlenen iğnemsî yapıların EDS analizleri.

Oksit olarak element (ağırlıkça%)	Numune 49 (a)
SiO <sub>2</sub>	16.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.52
Na <sub>2</sub> O	53.58
SO <sub>3</sub>	2.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.32
Mg	0.32

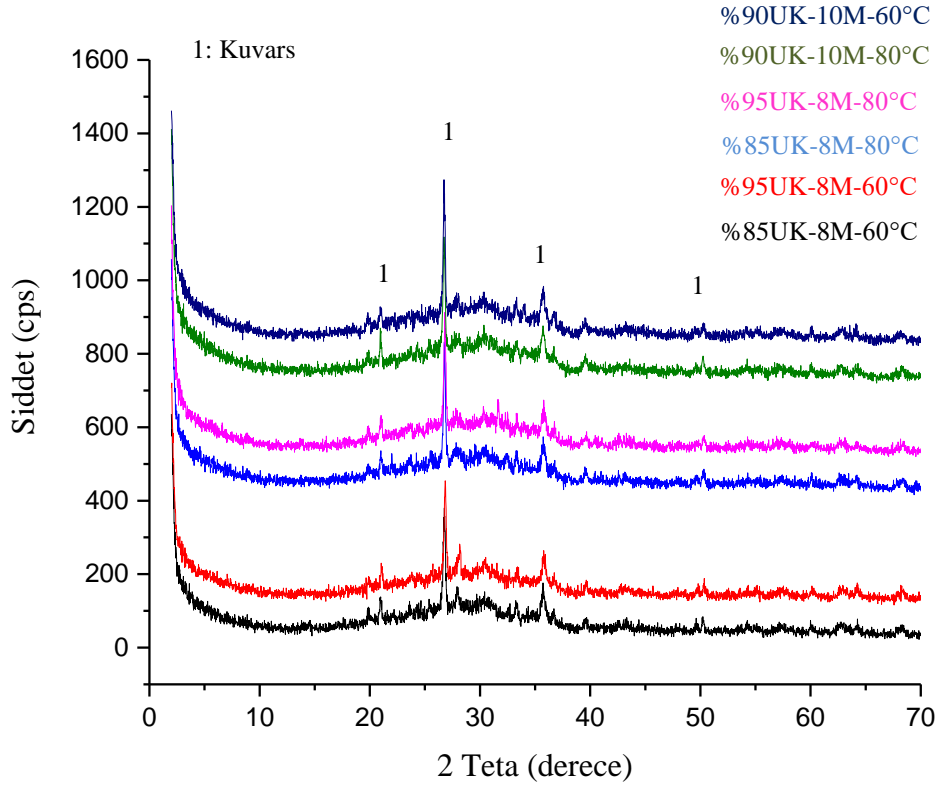
#### 4.4.5 XRD Analizi

Geopolimer köpük numunelerinin X-Işınları kırınımı analizi Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da sunulmuştur. Uçucu kül esaslı tüm numunelerin analiz sonuçlarında kuvars fazı tespit edilmiştir. Uçucu kül miktarının değişimi, molarite değişimi, kürlenme sıcaklığının değişiminin etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Uçucu kül camsı fazının çözünmesi sırasında oluşan bir geopolimer yapısı oluşumuna bağlı olarak amorf jellerin karakteristik geniş tümsekleri ( $2\theta = 20-40^\circ$ ) gözlemlendi. Eğrilerin altında kalan alanların benzer genişlikte olması sebebiyle tüm numunelerin benzer derecede reaksiyona girdiğini düşünülmüştür.



**Şekil 4.28** Karışım molaritesinin X ışınları analizine etkisi (UK= Uçucu Kül, M= Molarite, CS=kalsiyum stearat, °C= Kürlenme Sıcaklığı).

Alkali karışımın molaritesinin ve kürlenme sıcaklığının etkileri X-Işınları difraksiyonu yöntemiyle analiz edilmeye çalışılmış fakat yeni oluşan bir pik gözlemlenememiştir. Taramalı elektron mikroskopunda 10M'lık bir alkali karışımla ve 80°C'de gözlemlenen iğnemi yapıların yeni bir faz oluşturma ihtimali düşünülse de bu durum X-Işınları difraksiyonu yöntemi ile tanımlanamamıştır. Bunun sebebi olarak ise eğer yeni bir faz oluştu ise bile miktarsal olarak oldukça az olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.29** Kürlenme sıcaklığının ve uçucu kül miktarının X ışınları analizine etkisi (UK= Uçucu Kül, M= Molarite, °C= Kürlenme Sıcaklığı).

#### 4.5 FTIR Analizi

Geopolimerlerin FTIR analizlerinde sıklıkla görülen  $1000-600\text{ cm}^{-1}$  arasında görülen ana piklerin, T–O–Si bağlarının (T = Si veya Al) (Puertas ve Torres-Carrasco 2014) (Monich vd. 2018) asimetrik titreşimleri ile ilişkili olduğu bilinmektedir.  $970-800\text{ cm}^{-1}$  de görülen pik , Al–O–Si bağının bükülme titreşimleriyle ve  $\sim 420\text{ cm}^{-1}$ deki pik ise Si–O–Si bükülme titreşimi ile ilişkilidir (Tchakouté vd. 2016). Organik sürfaktan eklenen geopolimer kompozisyonlarında ise  $2200-1800\text{ cm}^{-1}$  dalga numaralı kısımda görülen küçük dalgalanmalar, organik yüzey aktif madde içeriğinden dolayı  $\text{CH}_2$ 'nin simetrik ve asimetrik

titreşimlerini göstermektedir (Monich vd. 2018).

Görülen piklerin şiddetleri sentezlenen geopolimerdeki fonksiyonel grupların miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aynı zamanda piklerdeki farklı dalga numarasına kaymalar ise jel matrikse farklı bir atomun dahil olması sebebiyle gerçekleşmektedir (C. M. Gunasekara, 2016). 3600-3000 ve 1650 $\text{cm}^{-1}$  de görülen geniş ve sivri titreşim bandının sırasıyla H-O-H bağlarının gerilmesi ve bükülmesini göstermektedir. Burada görülen titreşim pikleri geopolimer numunenin içermiş olduğu ya da gözeneklerde kalan su molekülleri ile ilgilidir (Anggarini vd. 2019, Guo vd. 2010). Gözeneklerin büyümesi ile daha fazla su molekülünün gözenek içerisinde bulunuyor olabileceğinin göstergesidir. H-O-H pikinin artmasının aslında gözenek yapısının genişlediği, daha düşük yoğunluklu bir malzeme elde edildiği ve bunun sonucunda da mukavemet değerlerinin düştüğünü gözlemlemek mümkündür.

Abdullah vd. köpük haline getirilen geopolimerlerdeki fonksiyonel gruptaki pik şiddetlerinin, yoğun olarak üretilen geopolimer muadillerine göre farklılık gösterebileceğinden bahsetmiştir. Bunun sebebi olarak ise eklenen köpürtücü ajanların ya da alüminyum tozunun amorf alüminosilikat jel ile polimerik yapı oluşumu için gerekli olan çözünür silika miktarını arttırması olduğundan söz etmektedir (Anggarini vd. 2019).

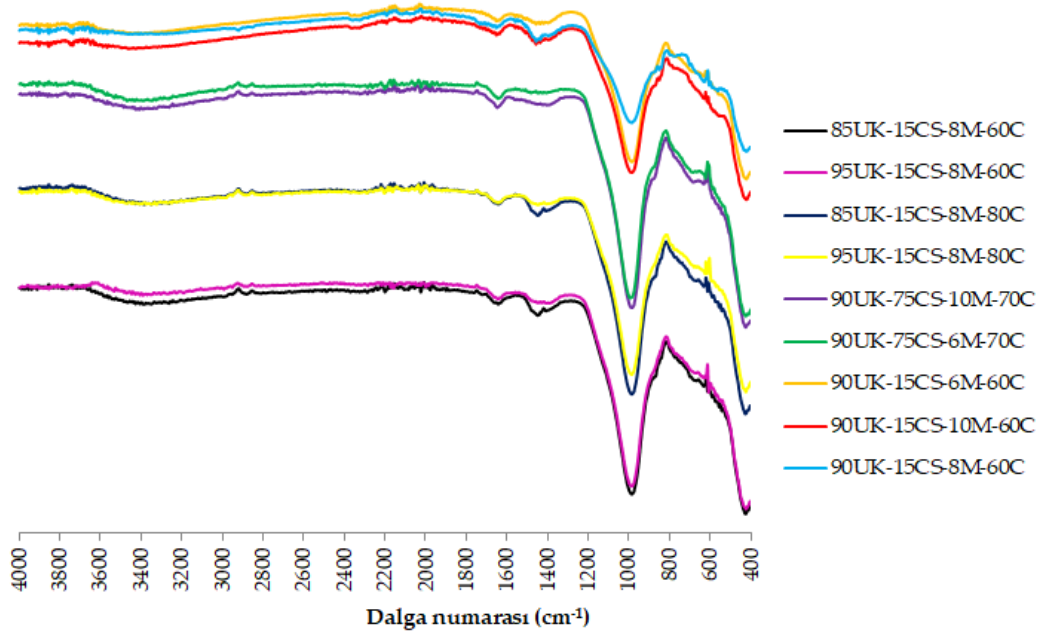
FTIR bantlarında görünen kimyasal bağlar, XRD sonuçlarında bulunan moleküllere karşılık gelmekle birlikte geopolimerin uygun şekilde aktive edildiğini belirtmektedir. Dalga boyundaki kaymalar ve pik şiddetinin artması ile pikin altında kalan alanın artması, çapraz bağlanmanın arttığının göstergesidir. Daha yüksek polimerizasyon derecesine sahip daha büyük alüminosilikat polimer molekülleri, daha iyi mekanik özelliklerin görülmesini sağlamaktadır (Tarameshloo vd. 2017).

Şekil 4.30'da sunulan geopolimer köpüklerin FTIR analizleri incelendiğinde ve daha önceki bölümlerde verilen basma mukavemetleri ile kuruma büzölmeleri göz önüne alındığında şu sonuçlara varılabilir: Karışımdaki uçucu kül miktarındaki artış, Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarının pik yoğunluklarının azalmasına neden olmuştur. Bu bağların miktarının azalması, basınç dayanımının azalması anlamına gelmektedir. Çizilen kontur grafiklerinde elde edilen sonuçlar FTIR analiz bulguları ile karşılaştırıldığında bu sonuçların birbirini desteklediği ortaya çıkmaktadır. Kürlenme sıcaklığındaki artış, çapraz bağ miktarında bir artışa neden olarak

mukavemet artışını sağlamaktadır. Aynı etki, karışımın molaritesinin arttırılmasıyla da elde edilmiştir. Molarite ve kürleme sıcaklığı ile doğru orantılı olan etki, mukavemet değerlerinde de gözlenmiştir. Molaritenin arttırılması ile pik tepe noktalarının hafif bir şekilde düşük dalga numarasına doğru kayması, geopolimer ağ yapısına Na, Al gibi atomların dahil olduğu ve ağ yapıyı çarpıttığı anlamına gelmektedir.(Şekil 4.30).

Geopolimer köpüklerde su içeriği ile kuruma büzülmesi arasındaki etki anlaşılmaya çalışılmış ve H-O-H bağları ile titreşim dalga boyları incelenmiştir. Kuenzel vd. NMR yöntemi ile molaritedeki artışın geopolimer içerisindeki yapısal su miktarında artışa neden olduğu bulgusu (Kuenzel vd. 2012), FTIR yöntemi ile doğrulanmıştır. Molaritenin artmasıyla pik H-O-H pik şiddetlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Ancak Si:Al miktarındaki artışın da yapısal suyu arttırdığı yönündeki görüşleri FTIR yöntemi ile desteklenememiştir.

Katkı maddesi olarak kullanılan kalsiyum stearatın, H-O-H titreşim bantlarının pik şiddetlerini azalttığı ve  $1400\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda görülen piklerin kaybolmasını sağladığı gözlenmiştir. Kalsiyum stearat miktarı ile ters orantılı olarak ölçülen kuruma büzülmesinin bununla ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Şekil 4.30).



**Şekil 4.30** Geopolimer köpük kompozisyonlarının FTIR incelemeleri.( Kısaltmalar: UK: Uçucu kül, CS:Kalsiyum stearat, M: Molarite, C:Santigrat derece).

## 4.6 Karışım Özellikleri

### 4.6.1 Kıvam

Çimentolu sistemlerle benzerlikleri sebebiyle, yayılma testi gibi yöntemler de kıvam analizi konusu da dikkate alınabilmektedir (Pacheco-Torgal vd. 2015). Karışımın kıvamı iç gözenek miktarının ve boyutlarının özelliğini belirlemekle birlikte ürünün mukavemeti ve dayanıklılığı da belirlemektedir. Bu sebeple hazırlanan karışımların kıvam özelliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Deneyde uçucu kül-metakaolen, kalsiyum stearat ve NaOH miktarı değişken olarak kullanılmıştır. Hidrojen peroksit, perlit ve kürlenme sıcaklıkları kıvam analizi için deney değişkenleri içerisinde eklenmemiştir (Çizelge 4.9).

**Çizelge 4.9** Akışkanlık ve yayılma testi için hazırlanan reçeteler.

Reçete	UK (%)	MK (%)	Kalsiyum Stearat (%)	Molarite (M)
1	85.00	15.00	0.45	6
2	95.00	5.00	0.45	8
3	85.00	15.00	0.45	6
4	95.00	5.00	0.45	10
5	85.00	15.00	0.15	8
6	95.00	5.00	0.15	10
7	85.00	15.00	0.75	6
8	95.00	5.00	0.75	8
9	90.00	10.00	0.75	10
10	90.00	10.00	0.75	8
11	90.00	10.00	0.15	8
12	90.00	10.00	0.15	10
13	90.00	10.00	0.45	8
14	90.00	10.00	0.45	6
15	90.00	10.00	0.45	8

Hazırlanan karışımların akış süreleri viskozite akış kabı Fordcup5 ile belirlenmiştir (Şekil 4.31). Her bir numunenin akış süresi Çizelge 4.10'da verilmiştir. Akış süresi belirlenen geopolimer çamurların yayılma çapları 4 cm yüksekliğinde, her iki yüzeyi açık (üst kısım 65 mm, alt kısım 73 mm çaplı) silindir malzeme yardımı ile cam yüzey üzerinde ölçülmüştür. Hazırlan karışımlar çok akışkan olduğundan dolayı yayılma tablasının vurdurularak karışımın yayılmasına gerek kalmamıştır. Bu sebeple ASTM C1437'de 15 sn'de tablanın 5 kez vurdurularak karışımın yayılmasının beklenmesi yerine, kalıp çıkarıldıktan sonra 1dk bekleyerek karışımların yayılmasının tamamlanması ve iki ölçüm alınarak yayılma çapının kaydedilmesi şeklinde ilerlemiştir (Şekil 4.32). Yayılma çaplarına ait değerler Çizelge 4.10'da verilmiştir.



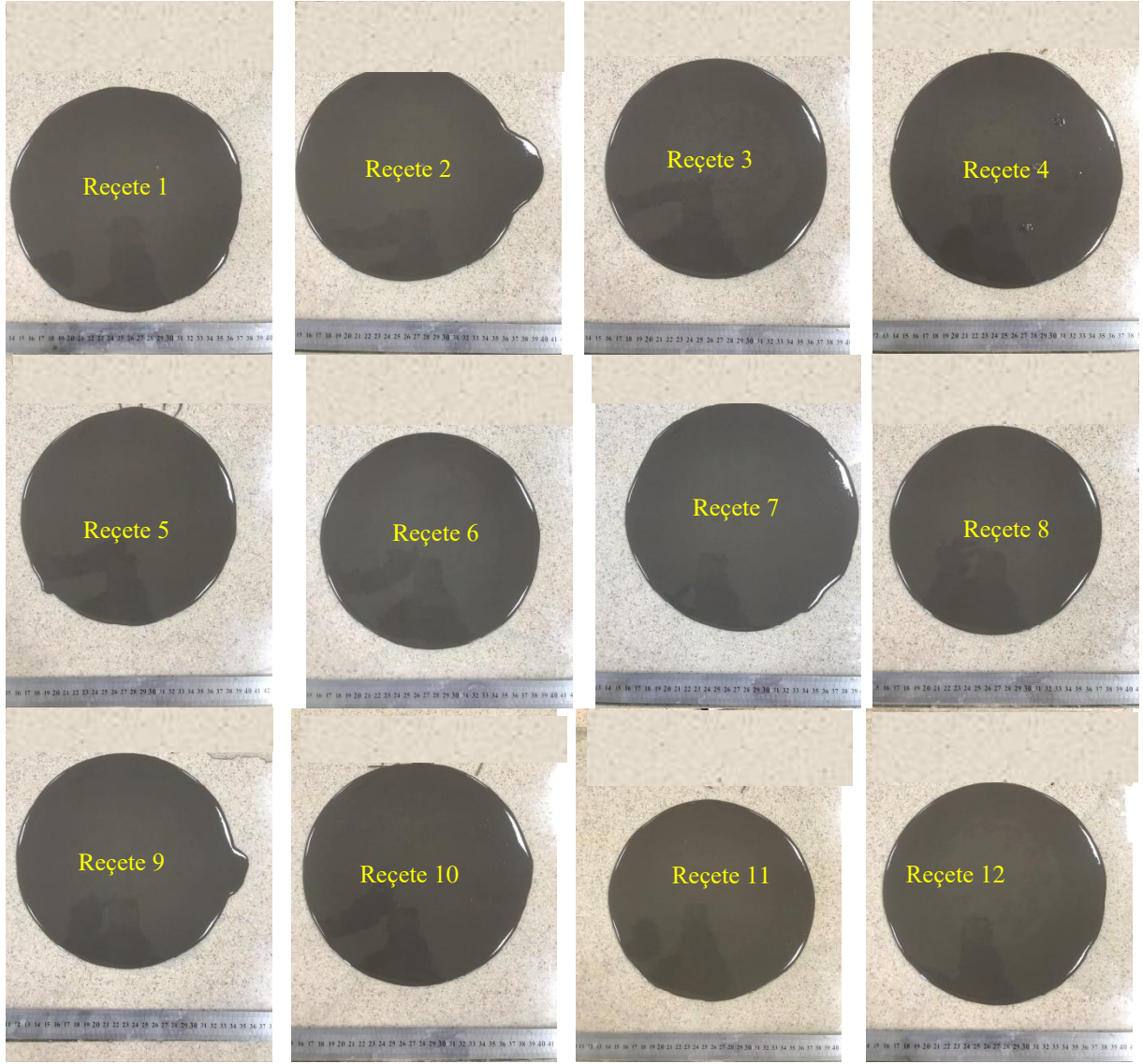
**Şekil 4.31** Fordcup5 yardımıyla geopolimer karışımlarının akış sürelerinin belirlenmesi.

Yapılan analiz sonucunda elde edilen akış süreleri ve yayılma çapı değerleri Minitab19 programına eklenerek kıvamları ile ilgili grafikler çizilmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 4.33a’da görüldüğü üzere NaOH ve kalsiyum stearat miktarının artması ile karışımın akış süresinin giderek arttığı gözlemlenmiştir. Grafikte en açık renkte olan alan <90sn’de olan akış süresini göstermekle birlikte rengin koyulaşması akış süresindeki artışı göstermektedir. Şekil 4.33b’deki grafik ise kalsiyum stearat-uçucu kül oranının akışkanlık üzerine etkisini göstermektedir. Bu grafikte ise stearat ve NaOH miktarına ek olarak uçucu kül miktarının artışının akışkanlık özelliğini değiştirdiği ve uçucu kül miktarı arttıkça numunenin akış hızının azaldığı gözlemlenmektedir.

**Çizelge 4.10** Geopolimer çamurunun kıvam analizi için hazırlanan kompozisyon ve geopolimer kompozisyonunun akış süresi ve yayılma çapına ilişkin analiz sonuçları.

	UK (%)	MK (%)	Kalsiyum Stearat (%)	Molarite (M)	Akış Süresi (sn)	Yayılma Çapı (cm)
1	85.00	15.00	0.45	6	126	24.50
2	95.00	5.00	0.45	8	106	22.70
3	85.00	15.00	0.45	6	129	22.30
4	95.00	5.00	0.45	10	153	24.30
5	85.00	15.00	0.15	8	70	21.70
6	95.00	5.00	0.15	10	103	22.00
7	85.00	15.00	0.75	6	210	22.60
8	95.00	5.00	0.75	8	152	23.60
9	90.00	10.00	0.75	10	152	21.50
10	90.00	10.00	0.75	8	220	21.00
11	90.00	10.00	0.15	8	75	22.80
12	90.00	10.00	0.10	10	112	22.70
13	90.00	10.00	0.45	8	92	24.70
14	90.00	10.00	0.45	6	98	23.20
15	90.00	10.00	0.45	8	90	23.70

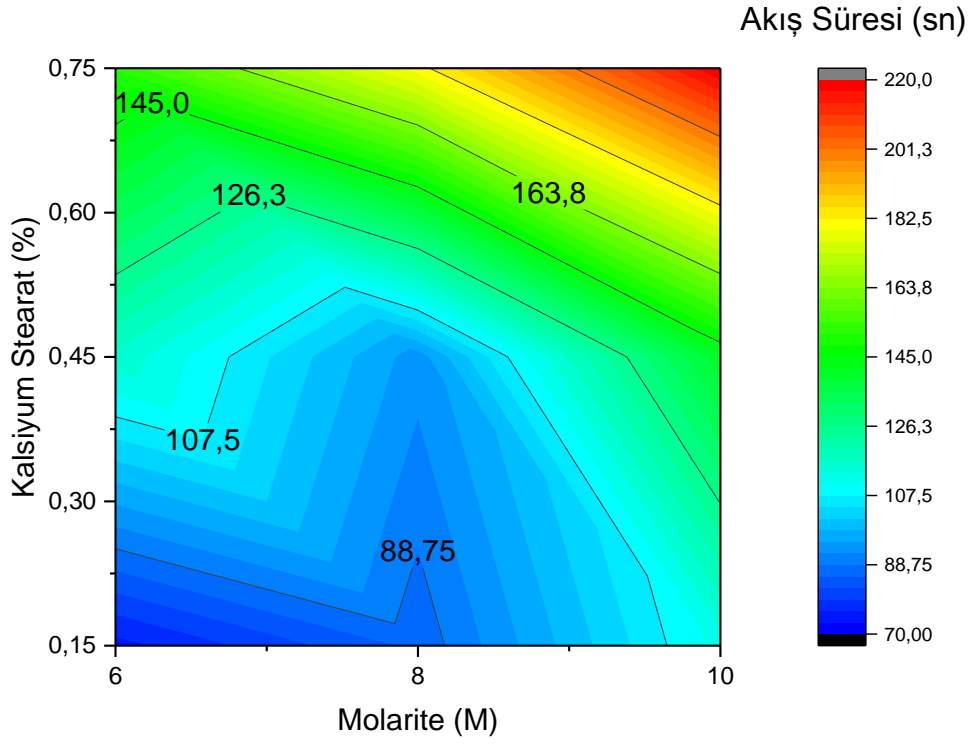




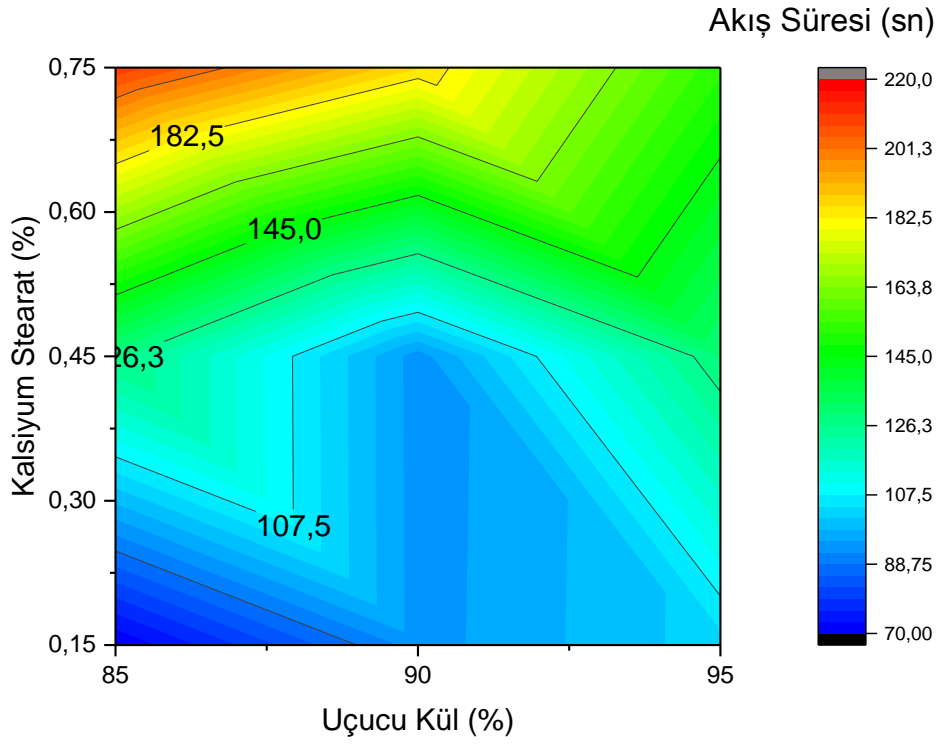
Şekil 4.32 Geopolimer karışımlarının kıvamlarının analizi ve karışımların yayılma çaplarının ölçülmesi.



a)



b)

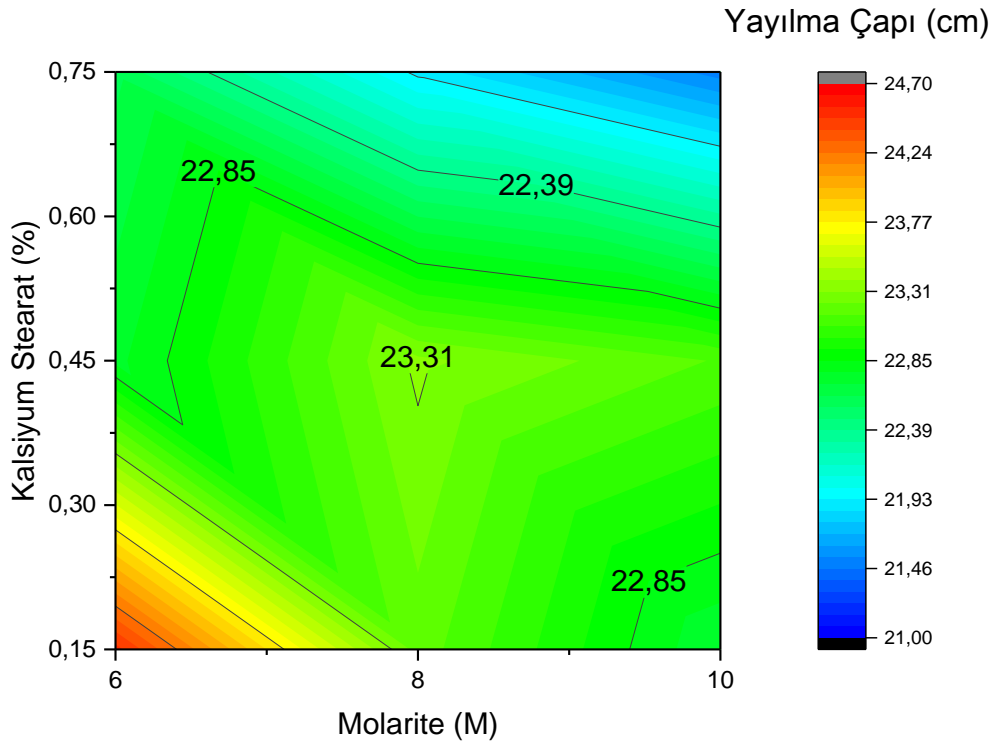


Şekil 4.33 Geopolimer karışımlarının akış sürelerinin verilerinin Minitab19 programı aracılığıyla analiz edilmesi.

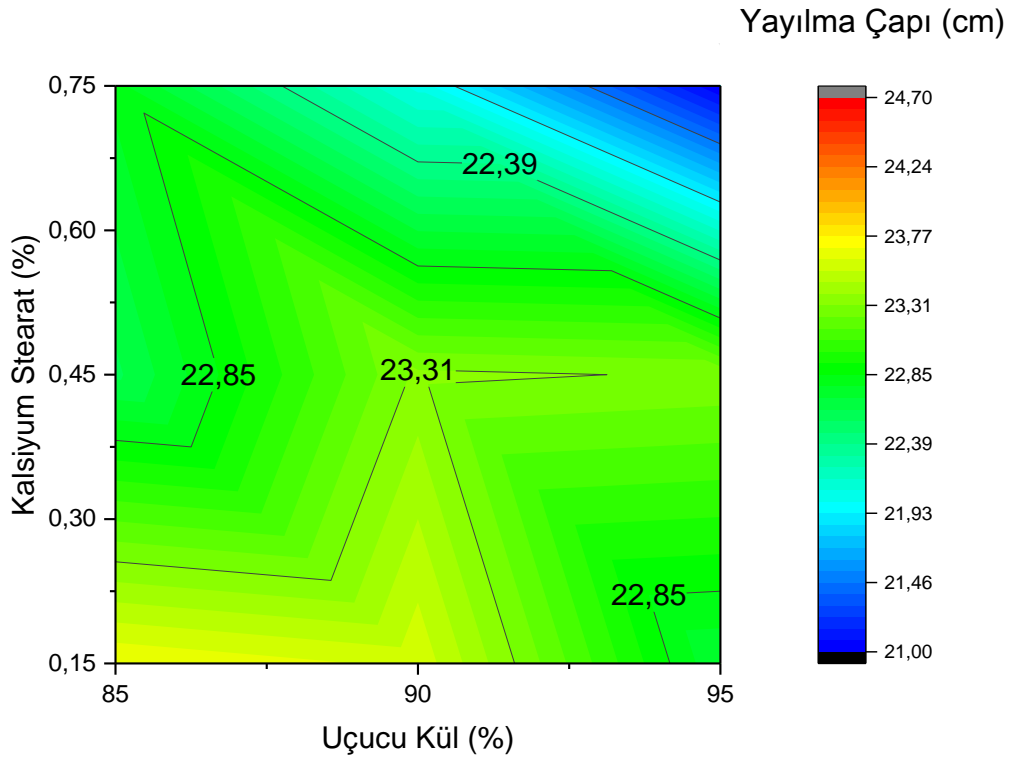
Hazırlanan geopolimer karışımlarının yayılma çapları incelendiğinde de akış özelliklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çizdirilen grafiklerde kalsiyum stearat miktarının artışının yayılma çapını azalttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda karışımdaki uçucu kül miktar artışının da hazırlanan karışımlardaki yayılma çapını arttırdığı gözlemlenmiştir. Grafiklerde en koyu renk en yüksek yayılma çapını göstermekle birlikte, renk tonunun açılması yayılma çapının azaldığını göstermektedir (Şekil 4.33).

Gözenek yapısının kalsiyum stearat ve molariteye bağlı olarak değişimi SEM ile analizi Şekil 4.34'de, kullanılan reçeteler Çizelge 4.10'da sunulmuştur. Analiz incelendiğinde stearatın gözenek büyüklüğü açısından önemli bir faktör olduğu anlaşılmaktadır. Kalsiyum stearat miktarı ile gözenek boyutunun önemli ölçüde küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bu durum kıvam analizinde gözlemlenen kalsiyum stearat miktarı artışı ile yayılma çapındaki azalma ve akış sürelerinin uzaması ile ilişkilendirilebilmektedir. Ayrıca karışımın alkali olmasını sağlayan NaOH de gözenek boyutunun küçülmesini ve gözeneklerin homojen dağılımlı olmasını sağlamıştır (Şekil 4.34). Geopolimer karışımları için önemli olan alkalilerin geopolimer mukavemeti üzerinde sağladığı etki kadar hücrel morfoloji üzerinde de etkisi olduğu fark edilmiştir. Bu durum gözenek boyutunun hem kalsiyum stearat miktarından ve hem de geopolimer karışımının molaritesinden etkilendiğini göstermektedir.

a)



b)



Şekil 4.34 Geopolimer karışımlarının yayılma çapı verilerinin Minitab19 programı aracılığıyla analiz edilmesi.

#### 4.7 Maliyet Analizi

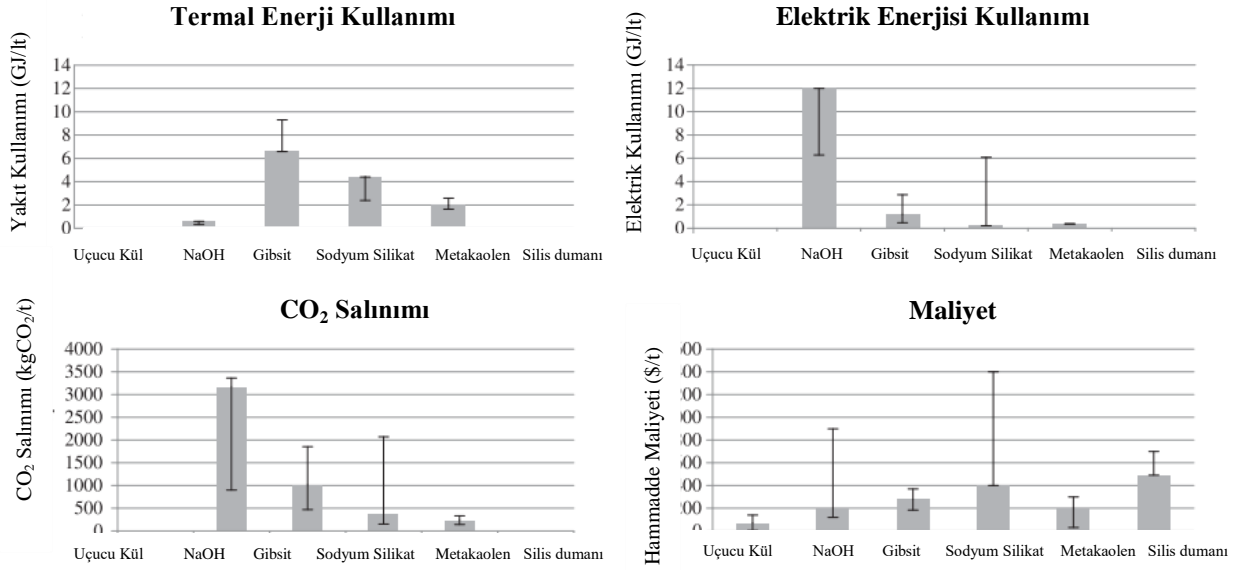
Geopolimer üretimi atık hammaddelerin kullanılabilmesi sayesinde atıkların geri dönüşümü konusunda öne çıkmakla birlikte düşük sıcaklıklarda üretilebilmeleri nedeniyle enerji tasarrufu açısından da dikkat çeken bir teknolojidir. Düşük sıcaklıklarda üretilebilmesi ve neredeyse maliyetsiz atıkların kullanılabilmesi ile maliyetinin düşük olması beklenmektedir. Ancak geopolimerleşme reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için gerekli olan alkali ortamın sağlanması amacıyla kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit üretim maliyetini bir hayli arttırmaktadır (Çizelge 4.11). Tez kapsamında hazırlanan reçetenin ortalama m<sup>3</sup> fiyatı yaklaşık 1192 tl olarak hesaplanmıştır. Bu fiyatın %73.25'ini ise kullanılan alkali karışım oluşturmaktadır

Çizelge 4.11 Hammaddelerin fiyatları (tl).

Uçucu Kül (Ton)	Metakaolen (Ton)	Sodyum Silikat (lt)	Sodyum Hidroksit (kg)	Kalsiyum Stearat (kg)	Fiber (kg)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (lt)	Su (lt)	Ek-1 (kg)	Ek-2 (kg)
21	700	4.4	2.24	12	8	7.4	3	0.55	20

Piyasada yalıtım plakası olarak kullanılan benzer yoğunluk ve ısı iletim değerlerine sahip olan ısı yalıtım plakasının m<sup>3</sup> fiyatı yaklaşık 1700tl arasında civarında değişkenlik göstermektedir (İnt. Kyn.6).

McLellan vd. geopolimer malzemeler ve normal portland çimentosu ile ilgili hem maliyet analizi hem de karbon ayak izi ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Şekil 4.35 geopolimer besleme stoklarının her biri için tahmini performans ölçüm değerlerini (yakıt, elektrik ve sera gazı emisyonları) göstermektedir. Gri bar grafik Avustralya'daki ortalama değerleri gösterirken hata çubukları literatürde verilen değer aralığını göstermektedir (McLellan vd. 2011). Hammaddelerin üretimleri aşamasında kullanılan termal enerji, elektrik enerjisi ve toplam maliyet gözden geçirildiğinde NaOH ve sodyum silikatın yüksek farkla fazla maliyete sebep olduğu açıkça görülmektedir. Aynı zamanda CO<sub>2</sub> salınımı açısından değerlendirildiklerinde yine geopolimer teknolojisi için kullanılan diğer hammaddelere göre daha yüksek salınımına sebep oldukları aşikârdır. Bu sebeple özellikle alkali ortamın oluşturulması açısından NaOH ve sodyum silikata alternatif hammaddelerin araştırılması bu teknolojinin geleceği açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.35 Geopolimer ham madde üretim ölçütleri ve hata çubukları (McLellan vd. 2011).

Geopolimer teknolojisinin gelişebilmesi ve tercih edilebilir bir yöntem olarak hayata geçirilebilmesi için sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanımının daha az olduğu bir yöntem geliştirilmeli ve bu malzemelerin kullanımı kısıtlanmalıdır. Bu konuda Puertas vd. (2014) atık camın kullanılması ve maliyet verimliliğinin artırılması ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Sodyum silikat, sodyum hidroksit ve atık cam kullanılarak hazırlanan geopolimer pastalarının ideal mekanik dayanıma sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu da sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı içerisinde çözdürülen cam içeriğindeki Si'nin en reaktif monomerik formunda çözünmesi olduğunu belirtmişlerdir. hem atık camın içerisinde hem de su camı içerisindeki SiO<sub>2</sub>'nin benzer davranışlar göstermesine bağlamışlardır.

#### 4.8 Bulguların İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi ve Uygun Çalışma Aralıklarının Belirlenmesi

Çalışmada elde edilen bulgular, istatistiksel açıdan değerlendirilmiştir. Tüm analizlerde güven aralığı %95,  $\alpha=0.05$  olarak alınmıştır. Uygulanan istatistiksel analizler açıklanmış ve çalışmada kullanılan değişkenlerle ilişkilendirilmiştir.

#### 4.8.1 Geopolimer Köpüklerin Mukavemet Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi

Geopolimer kompozisyonlarında kullanılan uçucu kül-metakaolen oranı, molarite, kalsiyum stearat miktarı, perlit miktarı, kürlenme sıcaklığı ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı gibi değişkenlerin hangisinin mukavemet gelişimine daha çok katkıda bulunduğunu araştırmak amacıyla Stepwise Selection metodu yardımıyla çoklu regresyon yapılmıştır ve faktörler incelenmiştir. Çizelge 4.12’de sunulduğu üzere SPSS, değişkenleri bağımlı değişkenle olan korelasyon güçlerine göre modele sıralamıştır. Modele giren her bir değişkenin etkisi ölçülmüş ve dört farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nin, kürlenme sıcaklığının, molaritenin ve perlit miktarının birlikte mukavemet gelişimi üzerinde etkili olduğu dördüncü modelde görülmektedir. Çizelge 4.12’de sunulan değişkenlerin ve modellerin anlamlılıkları (p-değeri) incelendiğinde söz konusu değişkenlerin arasındaki ilişkinin, değerlerin 0.05’den küçük olmaları sebebiyle istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.12** Mukavemet üzerinden etkili olduğu düşünülen düşünülen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi

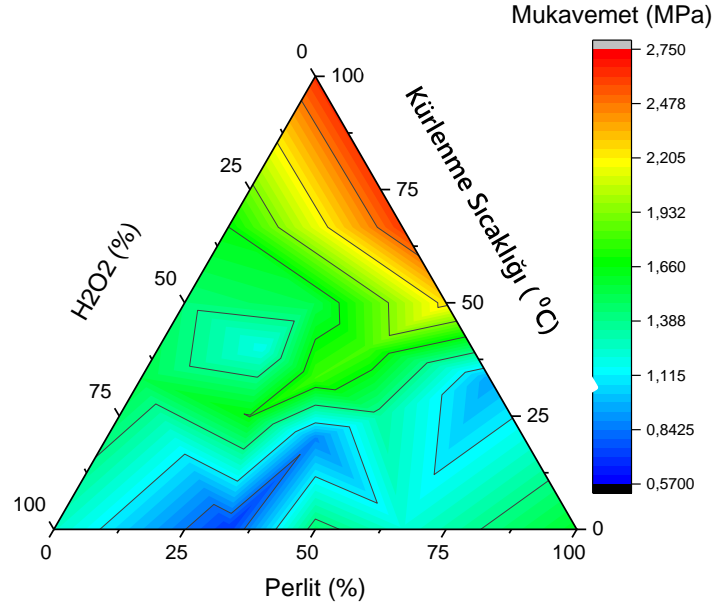
	Model	B	Std. Hata	Beta	p-değeri (değişkenler)	p-değeri (model)	R <sup>2</sup>	İkili r	Kısmi r
1	Sabit	2.752	0.305		0.000		0.229		
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-0.779	0.198	-0.479	0.000	<0.001		-0.624	-0.539
2	Sabit	1.220	0.729		0.100		0.301		
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-0.779	0.191	-0.479	0.000	<0.001		-0.624	-0.539
	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	0.022	0.010	0.269	0.026			0.518	0.485
3	Sabit	0.412	0.793		0.605		0.363		
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-0.779	0.184	-0.479	0.000			-0.624	-0.539
	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	0.022	0.009	0.269	0.021	<0.001		0.518	0.485
	Molarite (M)	0.101	0.046	0.248	0.033			0.340	0.210
4	Sabit	0.614	0.767		0.427		0.424		
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-0.779	0.177	-0.479	0.000			-0.624	-0.539
	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	0.022	0.009	0.269	0.017	<0.001		0.518	0.485
	Molarite (M)	0.101	0.044	0.248	0.026			0.340	0.210
	Perlit (%)	-0.073	0.032	-0.248	0.027			-0.616	-0.215

Standardize edilmiş regresyon katsayısına ( $\beta$ ) göre, değişkenlerin mukavemet üzerinde göreceli önem sırası;  $H_2O_2$  miktarı, kürlenme sıcaklığı, molarite ve perlit miktarıdır. Beta değerinin çoklu regresyonda bağımsız değişkenin bağımlı üzerindeki etkisini açıklaması hususuna dayanarak  $H_2O_2$  ve perlitin mukavemet ile negatif ilişkili ve kürlenme sıcaklığı ile molaritenin pozitif ilişkili olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 4.12’de sunulduğu üzere her modelde farklı  $R^2$  değerleri hesaplanmıştır. Modellere eklenen faktörler ile modellerin açıklayıcılığı değişmiştir. Hidrojen peroksit, kürlenme sıcaklığı, molarite ve perlit değişkenleri birlikte orta düzeyde ve anlamlı bir ilişki vermektedir ( $R^2=0.424$  ve  $p<0.05$ ). Bu üç değişken birlikte, mukavemet değerlerinin toplam varyansının yaklaşık % 42.1’ini açıklamaktadır.

Mukavemet değeri ve değişkenler arasındaki ikili ve kısmi korelasyonlar incelendiğinde  $H_2O_2$  ile mukavemet değerleri arasında negatif yönlü ve orta düzeyde ( $r=-0.624$ ), diğer değişkenler kontrol edildiğinde  $r=-0.539$  olarak hesaplanmıştır. Kürlenme sıcaklığı ile mukavemet değerleri arasında pozitif yönlü ve orta düzeyde ikili ( $r=0.518$ ) ve kısmi ( $r=0.485$ ) korelasyon hesaplanmıştır. Molarite ve mukavemet değerleri arasında orta düzeyde ( $r=0.340$ ) pozitif ikili ve pozitif yönde zayıf ( $r=0.210$ ) kısmi korelasyon hesaplanmıştır. Perlit ve mukavemet değeri arasındaki ilişki incelendiğinde ise negatif yönde orta düzeyde ikili ( $r=0.616$ ) ve negatif yönde zayıf ( $r=-0.215$ ) kısmi korelasyon hesaplanmıştır.

Model dört sayesinde mukavemet değerini en çok etkileyen parametreler göz önünde bulundurularak üçlü diyagram çizilmiş ve çalışma aralığı tespit edilmiştir (Şekil 4.36). Perlit molariteye göre daha yüksek korelasyona sahip olduğu için üçüncü değişken olarak perlit seçilmiştir.



**Şekil 4.36** Mukavemet üzerinde en etkili faktörlerin üçlü grafiklerde sunulması ve çalışma aralığı tespiti.

Çalışmada kullanılan değerler kendi içlerinde 100 üzerinden normalize edilmişlerdir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> için 0=%1.0, 50=%1.0, 100=%2.0 değerini ifade etmektedir. Kürlenme sıcaklığı için 0=60°C, 50=70°C ve 100=80°C'yi göstermektedir. Perlit için 0=%0, 50=%2.75, 100=%5.5 oranını ifade etmektedir. Çalışmanın başında belirlenen 1.0MPa ve üzerinde hedeflenen mukavemet değeri göz önünde bulundurulduğunda, üçgen grafik üzerinde kırmızı, sarı ve yeşilin kapladığı alanda olmak hedeflenen değer ve üzerinde mukavemet değerlerine ulaşılabileceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla maksimum %1.0 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, minimum 70°C'de hazırlanan ve herhangi miktarda perlit içeren numunelerde >1.0MPa mukavemet elde edilmesi mümkündür. Kürlenme sıcaklığının belirlenen değerden daha düşük ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarının belirlenen değerinin üstünde olan bölgelerde renk turkuaz ve lacivert renklere dönmekle birlikte hedeflenen değer altındaki mukavemet değerlerine ulaşılması muhtemeldir.

#### 4.8.2 Geopolimer Köpüklerin Yoğunluk Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi

Geopolimer kompozisyonlarında kullanılan uçucu kül-metakaolen oranı, molarite, kalsiyum stearat miktarı, perlit miktarı, kürlenme sıcaklığı ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı gibi değişkenlerin hangisinin yoğunluk değerlerine daha çok katkıda bulunduğunu araştırmak amacıyla Stepwise Selection metodu yardımıyla çoklu regresyon yapılmıştır ve faktörler incelenmiştir.



Çizelge 4.13’de sunulduğu üzere SPSS, değişkenleri bağımlı değişkenle olan korelasyon güçlerine göre modele sıralamıştır. Modele giren her bir değişkenin etkisi ölçülmüş ve üç farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerde peroksitin, kürlenme sıcaklığının, molaritenin birlikte yoğunluk üzerinde etkili olduğu üçüncü modelde görülmektedir. Çizelge 4.13’de sunulan değişkenlerin ve modellerin anlamlılıkları (p-değeri) incelendiğinde söz konusu değişkenlerin arasındaki ilişkinin, değerlerin 0.05’den küçük olmaları sebebiyle istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.13** Yoğunluk üzerinde etkili olduğu düşünülen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi.

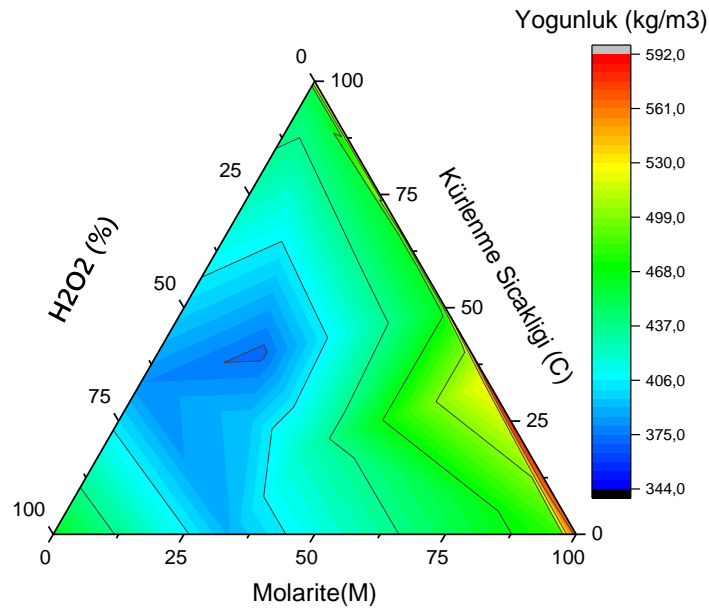
	Model	B	Std. Hata	Beta	p-değeri (değişkenler)	P-değeri (model)	R <sup>2</sup>	İkili r	Kısmi r
<b>1</b>	Sabit	696.037	24.728		0.000	0.000	0.788	-0.789	-0.851
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-	16.093	-0.788	0.000				
<b>2</b>	Sabit	570.704	34.494		0.000	0.000	0.855	-0.789	-0.851
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-	13.677	-0.788	0.000				
	Molarite (M)	15.667	3.419	0.332	0.000				
<b>3</b>	Sabit	687.370	56.011		0.000	0.000	0.874	-0.789	-0.851
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	-	12.983	-0.788	0.000				
	Molarite (M)	15.667	3.246	0.332	0.000				
	Kürlenme Sıcaklığı (°C)	-1.667	0.649	-0.177	0.013				

Standardize edilmiş regresyon katsayısına ( $\beta$ ) göre, değişkenlerin yoğunluk üzerinde görece önem sırası; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı, molarite ve kürlenme sıcaklığıdır. Beta değerinin çoklu regresyonda bağımsız değişkenin bağımlı üzerindeki etkisini açıklaması hususuna dayanarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve kürlenme sıcaklığının yoğunluk değerleri ile pozitif yönde ilişkili ve molaritenin pozitif yönde ilişkili olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 4.13’de sunulduğu üzere her modelde farklı  $R^2$  değerleri hesaplanmıştır. Modellere eklenen faktörler ile modellerin açıklayıcılığı değişmiştir ve artış eğiliminde olmuştur. Hidrojen peroksit, kürlenme sıcaklığı, molarite birlikte güçlü düzeyde ve anlamlı bir ilişki vermektedir ( $R^2=0.874$  ve  $p<0.05$ ). Bu üç değişken birlikte, yoğunluk değerlerinin toplam varyansının yaklaşık % 87.4’ünü açıklamaktadır.

Yoğunluk değeri ve değişkenler arasındaki ikili ve kısmi korelasyonlar incelendiğinde  $H_2O_2$  ile yoğunluk değerleri arasında negatif yönlü ve güçlü düzeyde ( $r=-0.789$ ), diğer değişkenler kontrol edildiğinde  $r=-0.851$  olarak hesaplanmıştır. Kürlenme sıcaklığı ile yoğunluk değerleri arasında pozitif yönlü ve düşük düzeyde ikili ( $r=0.177$ ) ve kısmi ( $r=0.341$ ) korelasyon hesaplanmıştır. Molarite ve yoğunluk değerleri arasında orta düzeyde ( $r=0.332$ ) pozitif ikili ve pozitif yönde orta düzeyde ( $r=0.564$ ) kısmi korelasyon hesaplanmıştır.

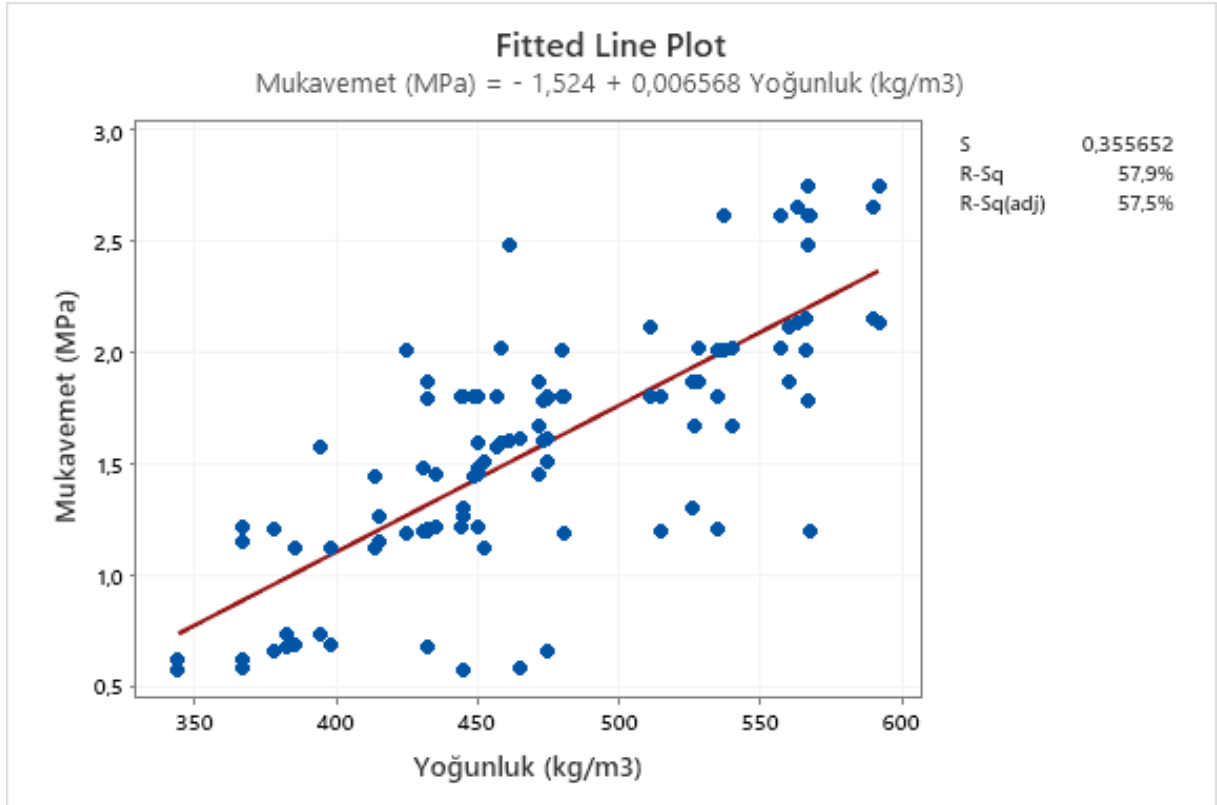
Model üç sayesinde yoğunluk değerini en çok etkileyen parametreler göz önünde bulundurularak üçlü diyagram çizilmiştir ve çalışma aralığı tespit edilmiştir (Şekil 4.37).



**Şekil 4.37** Yoğunluk değerleri üzerinde en etkili faktörlerin üçlü grafiklerde sunulması ve çalışma aralığı tespiti.

Çalışmada kullanılan değerler kendi içlerinde 100 üzerinden normalize edilmişlerdir. Hidrojen peroksit için 0=%1.0, 50=%1.5, 100=%2.0 değerini ifade etmektedir. Kürlenme sıcaklığı için 0=60°C, 50=70°C ve 100=80°C'yi göstermektedir. Molarite için 0=6M, 50=8M, 100=10M değerlerini ifade etmektedir. Çalışmanın başında belirlenen 450-550kg/m<sup>3</sup> aralığında hedeflenen yoğunluk değeri göz önünde bulundurulduğunda, üçgen grafik üzerinde kırmızı, sarı ve yeşilin kapladığı alanda olmak hedeflenen yoğunluk değerinde numune hazırlandığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla 8M ve üzerinde hazırlanan ≤%1.5 oranında peroksit içeren ve herhangi bir kürlenme sıcaklığında kürlenmiş numuneler için hedeflenen yoğunluk aralığında numune üretilmesi mümkündür.

Şekil 4.38'de sunulan yoğunluk değerleri ve mukavemet değerleri arasındaki ilişki sunulmuştur. Şekil incelendiğinde yoğunluk değerleri ve mukavemet değerleri arasında pozitif yönlü bir ilişkiye bulunduğu görülmektedir. Yani yoğunluk değerlerindeki artış, mukavemet artışını sağlamıştır. Belirlilik katsayısı (R<sup>2</sup>) incelendiğinde ise modelin %57.9'unun (orta düzeyde) açıklanabildiği görülmektedir.



Şekil 4.38 Yoğunluk değerlerinin mukavemet değerleri ile ilişkilendirilmesi.

### 4.8.3 Geopolimer Köpüklerin Kuruma Büzülmesi Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi

Geopolimer kompozisyonlarında kullanılan uçucu kül-metakaolen oranı, molarite, kalsiyum stearat miktarı, perlit miktarı, kürlenme sıcaklığı ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı gibi değişkenlerin hangisinin kuruma büzülmesi üzerinde etkiye sahip olduğunu araştırmak amacıyla Stepwise Selection metodu yardımıyla çoklu regresyon yapılmıştır ve faktörler incelenmiştir.

Çizelge 4.14'de sunulduğu üzere SPSS, değişkenleri bağımlı değişkenle olan korelasyon güçlerine göre modele sıralamıştır. Modele giren her bir değişkenin etkisi ölçülmüş ve üç farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerde kürlenme sıcaklığının, molaritenin ve uçucu külün birlikte kuruma büzülmesi üzerinde etkili olduğu üçüncü modelde görülmektedir. Çizelge 4.14'de sunulan değişkenlerin ve modellerin anlamlılıkları (p-değeri) incelendiğinde söz konusu değişkenlerin arasındaki ilişkinin, değerlerin 0.05'den küçük olmaları sebebiyle istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür.

Standardize edilmiş regresyon katsayısına ( $\beta$ ) göre, değişkenlerin kuruma büzülmesi üzerinde görece önem sırası; kürlenme sıcaklığı, molarite ve uçucu kül miktarıdır. Beta değerinin çoklu regresyonda bağımsız değişkenin bağımlı üzerindeki etkisini açıklaması hususuna dayanarak kürlenme sıcaklığının kuruma büzülmesi değerleri ile pozitif yönde ilişkili; molarite ve uçucu kül miktarının ise negatif yönde ilişkili olduğunu söylemek mümkündür.

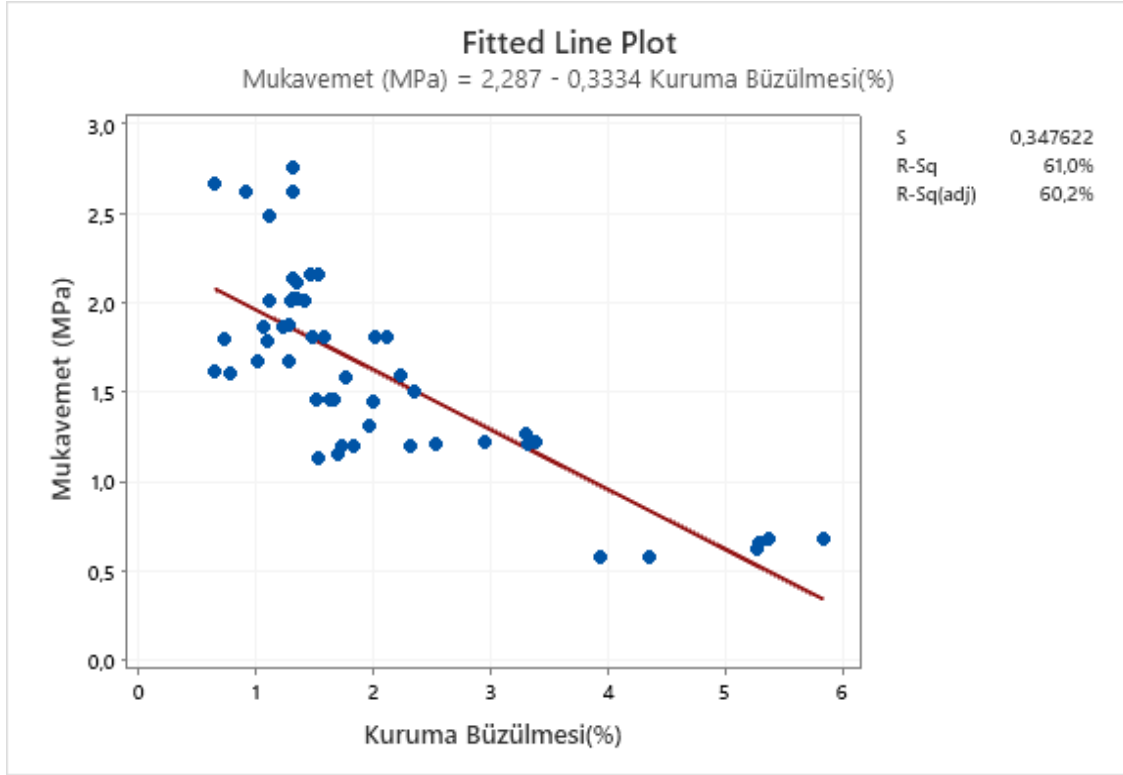
Çizelge 4.14'de sunulduğu üzere her modelde farklı R<sup>2</sup> değerleri hesaplanmıştır. Modellere eklenen faktörler ile modellerin açıklayıcılığı değişmiştir ve artış eğiliminde olmuştur. Kürlenme sıcaklığı, molarite ve uçucu kül birlikte güçlü düzeyde ve anlamlı bir ilişki vermektedir (R<sup>2</sup>=0.782 ve p<0.05). Bu üç değişken birlikte, yoğunluk değerlerinin toplam varyansının yaklaşık % 78.2'sini açıklamaktadır.

Kuruma büzülmesi ve değişkenler arasındaki ikili ve kısmi korelasyonlar incelendiğinde kürlenme sıcaklığı ile kuruma büzülmesi arasında pozitif yönlü ve güçlü düzeyde (r=-0.792), diğer değişkenler kontrol edildiğinde r=-0.870 olarak hesaplanmıştır. Molarite ile kuruma büzülmesi arasında pozitif yönlü ve düşük düzeyde ikili (r=0.269) ve orta düzeyde kısmi (r=0.506) korelasyon hesaplanmıştır. Uçucu kül içeriği ile kuruma büzülmesi arasında da orta düzeyde (r=-0.431) negatif ikili ve negatif yönde orta düzeyde (r=-0.332) kısmi korelasyon hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.14** Kuruma büzülmesi üzerinde etkili olduğu düşünülen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi.

	Model	B	Std. Hata	Beta	p-değeri (değişkenler)	P-değeri (model)	R <sup>2</sup>	İkili r	Kısmi r
<b>1</b>	Sabit	-7.373	1.020		0.000				
	Kürlenme Sıcaklığı(°C)	0.136	0.015	0.792	0.000	0.000	0.628	0.792	0.870
<b>2</b>	Sabit	-7.666	0.838		0.000				
	Kürlenme Sıcaklığı(°C)	0.185	0.015	1.078	0.000	0.000	0.755	0.792	0.870
	Molarite (M)	-0.391	0.076	-0.457	0.000			0.269	0.506
<b>3</b>	Sabit	-2.213	2.331		0.347				
	Kürlenme Sıcaklığı(°C)	0.203	0.016	1.185	0.000			0.792	0.870
	Molarite (M)	-0.322	0.078	-0.376	0.000	0.000	0.782	0.269	0.506
	Uçucu Kül (%)	-0.081	0.033	-0.236	0.016			-0.431	-0.332

Kuruma büzülmesi ile mukavemet arasındaki ilişkiyi gözlemlemek amacıyla yapılan analiz Şekil 4.39'da sunulmuştur. Şekil incelendiğinde kuruma büzülmesi ve mukavemet değerleri arasında negatif yönlü bir ilişkiye bulunduğu görülmektedir. Yani kuruma büzülmesindeki artış, mukavemet değerlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Belirlilik katsayısı (R<sup>2</sup>) incelendiğinde ise modelin %61.0'mın (orta düzeyde) açıklanabildiği görülmektedir.



**Şekil 4.39** Kuruma büzülmesi değerlerinin mukavemet ile ilişkilendirilmesi.

#### 4.8.4 Geopolimer Köpüklerin Termal İletkenlik Analizlerinin İstatistiksel Açıdan Değerlendirilmesi

Geopolimer kompozisyonlarında kullanılan uçucu kül-metakaolen oranı, molarite, kalsiyum stearat miktarı, perlit miktarı, kürlenme sıcaklığı ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı gibi değişkenlerin hangisinin termal iletkenlik üzerinde etkiye sahip olduğunu araştırmak amacıyla Stepwise Selection metodu yardımıyla çoklu regresyon yapılmıştır ve faktörler incelenmiştir.

Çizelge 4.15'te sunulduğu üzere SPSS, değişkenleri bağımlı değişkenle olan korelasyon güçlerine göre modele sıralamıştır. Modele giren her bir değişkenin etkisi ölçülmüş ve tek model oluşmuştur. Bu modelde kürlenme sıcaklığının, molaritenin, perlitin ve uçucu külün birlikte termal iletkenlik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Çizelge 4.15'te sunulan değişkenlerin ve modellerin anlamlılıkları (p-değeri) incelendiğinde söz konusu değişkenlerin arasındaki ilişkinin, değerlerin 0.05'ten büyük olduğu görülmüştür. Sıcak plaka yöntemi ile ölçümlerin pahalı olması sebebiyle sınırlı sayıda numuneye yapılan testler sebebiyle bu şekilde sonuçların elde edildiği düşünülmektedir. Sonuçların bütünü yansıtmaya da karşılaştırma ve yorum yapma ihtimali sunmuştur.

Standardize edilmiş regresyon katsayısına ( $\beta$ ) göre, değişkenlerin termal iletkenlik üzerinde görece önem sırası; kalsiyum stearat miktarı, molarite ve  $H_2O_2$  dir. Beta değerinin çoklu regresyonda bağımsız değişkenin bağımlı üzerindeki etkisini açıklaması hususuna dayanarak termal iletkenliğin kalsiyum stearat miktarı ile negatif yönde ilişkili, molarite ile pozitif yönde ilişkili ve  $H_2O_2$  ile negatif yönde ilişkili olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 4.15'te sunulduğu üzere  $R^2$  değerleri 0.554 olarak hesaplanmıştır. Bu değişkenlerin termal iletkenlik değerinin toplam varyansının %55.4'ünü açıklamaktadır.

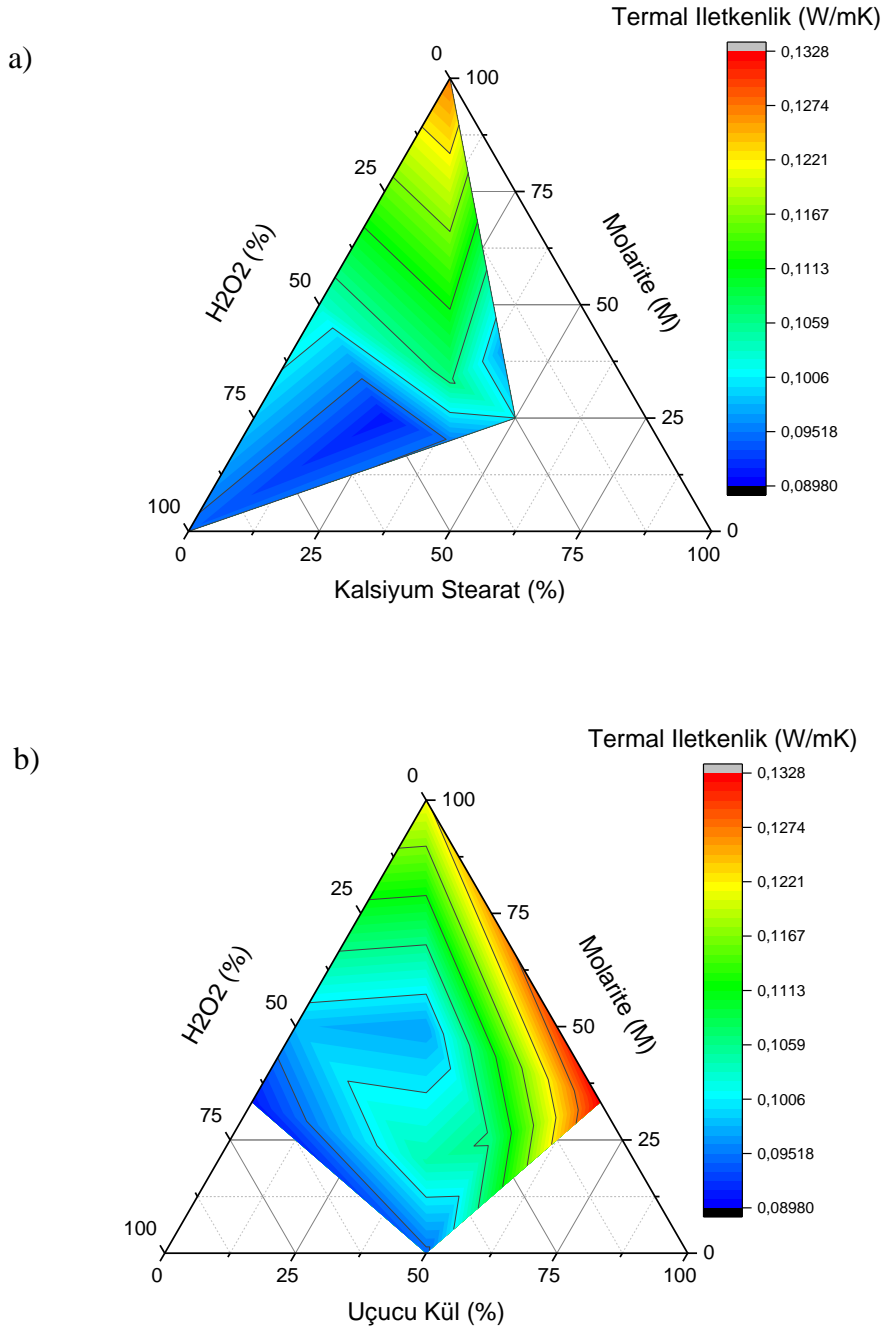
Termal iletkenlik ve değişkenler arasındaki ikili ve kısmi korelasyonların incelemesi Çizelge 4.15'te sunulmuştur. Kısmi korelasyon beta değerinde görece önem sırasında en önemli görülen üç değişken için hesaplanmıştır. Veriler incelendiğinde kalsiyum stearat ile termal iletkenlik arasında negatif yönlü ve orta düzeyde ( $r=-0.393$ ), diğer değişkenler kontrol edildiğinde yine negatif yönlü ve orta düzeyde ( $r=-0.449$ ) hesaplanmıştır. Molarite ile termal iletkenlik arasında pozitif yönlü ve düşük düzeyde ikili ( $r=0.251$ ) ve orta düzeyde kısmi ( $r=0.621$ ) korelasyon hesaplanmıştır. Peroksit içeriği ile termal iletkenlik arasında da orta düzeyde ( $r=-0.425$ ) negatif ikili ve negatif yönde orta düzeyde ( $r=-0.279$ ) kısmi korelasyon hesaplanmıştır.

Çizelge 4.15 Termal iletkenlik üzerinde etkili olduğu düşünülen faktör verilerinin istatistiksel olarak analizi.

Model	B	Std. Hata	Beta	p-değeri (değişkenler)	p-değeri (model)	$R^2$	İkili r	Kısmi r
Sabit	0.078	0.030		0.044				
Kalsiyum Stearat (%)	-0.029	0.015	-0.712	0.110			-0.393	-0.449
<b>1</b> Uçucu Kül (%)	-0.001	0.001	0.259	0.279	0.318	0.554	0.473	
Perlit (%)	-0.002	0.002	-0.237	0.380			-0.305	
Molarite	0.007	0.004	0.619	0.127			0.251	0.621
$H_2O_2$ (%)	0.002	0.003	-0.350	0.500			-0.425	-0.279

Seçilen üç değişken sayesinde yoğunluk değerini en çok etkileyen parametreler göz önünde bulundurularak üçlü diyagram çizilmiş ve çalışma aralığı tespit edilmiştir (Şekil 4.40). Çizilen

ilk diyagramda yetersiz veri sebebiyle molarite hakkında bilgi edinilememsi üzerine, Çizelge 4.15'te sunulan beta değerleri göz önünde bulundurularak sıralamaya uygun şekilde seçilebilecek dördüncü değişken olan uçucu kül ile yeni bir diyagram daha çizilmiştir.



**Şekil 4.40** Termal iletkenlik değerleri üzerinde en etkili faktörlerin üçlü grafiklerde sunulması ve çalışma aralığı tespiti. a)Peroksit, Molarite, Kalsiyum Stearat değişkenleri ile üçlü grafik incelemesi. b)  $H_2O_2$ , Molarite uçucu kül değişkenleri ile üçlü grafik incelemesi.

Çalışmada kullanılan değerler kendi içerisinde 100 üzerinden normalize edilmiştir.  $H_2O_2$  için 0=%1.0; 50=%1.5, 100=%2.0 değerini ifade etmektedir. Molarite için 0=6M, 50=8M,



100=10M değerlerini ifade etmektedir. Kalsiyum stearat için 0=%0.15, 50=%0.45 ve 100=%0.75'i göstermektedir. Uçucu kül için ise 0=%85, 50=%90 ve 100=%95 oranında uçucu kül içeriğini göstermektedir. Çalışmanın başında belirlenen  $<0.12\text{W/mK}$  hedeflenen termal iletkenlik değeri göz önünde bulundurulduğunda, üçgen grafik üzerinde yeşil, turkuaz ve lacivert renklerin kapladığı alanda olmak hedeflenen değerlere ulaşılabilir alanları temsil etmektedir. Dolayısıyla 8M ve üzerinde hazırlanan  $\geq 1.5$  oranında  $\text{H}_2\text{O}_2$  içeren karışımların hedeflenen değerlere ulaştırabileceğini söylemek net olarak mümkündür. Ayrıca Uçucu kül miktarındaki artışa bağlı olarak termal iletkenlik değerlerinin artışa geçtiği de net olarak görülmektedir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu doktora tezi kapsamında, uçucu kül esaslı geopolimer köpük özelliklerinin araştırılması konusunda araştırmalar yapılmıştır. Tez çalışmasının ilk basamağında reçete çalışmaları ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel tasarımı ile 6 farklı değişken, 3 farklı seviyede çalışılmıştır. Bu sayede daha az deney ile daha fazla veri elde edilmiştir. Deneysel tasarımı ile 54 farklı reçete ile elde edilen bulgular, deneysel tasarım yöntemi kullanılmazaydı  $3^6$  (3 farklı seviyede 6 değişken için) toplamda 729 adet reçete hazırlanması gerekli olacaktı. Tez çalışmasının ikinci basamağında ise hazırlanan numuneler analiz edilmiştir. Analizler sonucunda mikro yapısal ve gözeneklerin yapısal özellikleri değerlendirilmiş ve nihai geopolimer sistemlerinin basınç dayanımı, kuruma büzülmesi, yoğunluk gibi özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, uçucu kül esaslı köpük geopolimerin kimyasal, fiziksel ve mineralojik özelliklerinin molarite, kürlenme sıcaklığı, perlit miktarı, kalsiyum stearat miktarı ve hidrojen peroksit miktarına bağlı olarak geopolimer köpüklerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini açıklamak için tüm veriler analiz edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar ve analizler sonucunda ulaşılan genel sonuçlar, maddeler halinde sıralanmıştır.

### **Mekanik Özellikleri ile İlgili Sonuçlar**

- Uçucu kül esaslı geopolimer köpüklerde metakaolen gibi daha reaktif bir alüminosilikat hammaddesinin kullanılması, geopolimerleşme kabiliyetini arttırmakla birlikte mukavemet değerlerinin olumlu yönde etkilemiştir.
- Uçucu kül esaslı geopolimer köpüklerde karışım molaritesi, üretilen numunenin mukavemet değerlerini doğrudan etkilemektedir. Karışım molaritesindeki artış Si-O-Si ve Si-O-Al bağ miktarını arttırmış, dolayısıyla mukavemet değerleri de artmıştır.
- Kürlenme sıcaklığı olarak seçilen 60°C, 70°C ve 80°C sıcaklıklardaki numunelerin mukavemet değerleri karşılaştırıldığında 80°C'de kürlenmiş numuneler en iyi mukavemet değerlerini göstermiştir. Sıcaklık artışının mukavemet değerlerini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir.
- Hidrojen peroksit miktarındaki artış mukavemet değerlerini düşürmüştür. Hidrojen peroksit miktarındaki artış gözenek boyutlarının büyümesine ve yoğunluk düşüşüne sebep olduğundan dolayı mukavemet değerlerinin düşüşüne sebep olmuştur.

- Perlit miktarındaki artış mukavemet değerlerini düşürmüştür. Oldukça gözenekli ve düşük mukavemete sahip perlit tanecikleri gözenekli geopolimer yapısının içerisinde zayıf bölgeler oluşturarak mukavemet değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Ayrıca geopolimer matris-perlit tanecikleri arasında oluşan çatlaklar da mukavemet düşüşüne sebep olmuştur. Ara yüzeydeki çatlakların oluşum sebebi üzerinde ise ıslak şekilde kullanılan şişmiş haldeki perlitin, kuruma esnasında su kaybetmesi ve küçülmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.
- Karışıma eklenen polipropilen fiberler geopolimer matriksle uyumlu bağ oluşturmadığı için fiber-matriks arasında çatlaklar oluşmuştur. Oluşan bu çatlaklar üzerinde ise kalsiyum stearat katkısının da etkili olabileceği düşünülmektedir. Su itici özelliği bulunan kalsiyum stearat katkısının fiber-geopolimer matris arasında adezyon eksikliğine sebep olduğu ve bir boşluk hattı oluşturduğu düşünülmektedir. Çalışmada fiber miktarının mukavemet değerleri üzerine etkisi incelenmese de karışıma eklenme miktarı arttırılan fiberlerin mukavemet değerini daha da düşüreceği düşünülmektedir.
- Kalsiyum stearat katkısının mukavemet üzerine herhangi bir etkisi gözlemlenmemiştir.
- Çalışmada TSE 13655'e göre taşıyıcı olan veya olmayan her çeşit kâgir duvarlarda kullanılan köpük betonların 1.0MPa üzerinde mukavemete sahip olması hedeflenmişti. Bu hedeften yola çıkılarak %1.75'ten fazla hidrojen peroksit içermeyen numuneler için hedeflenen değere ulaşılmıştır. Tüm değişkenler göz önünde bulundurulduğunda mukavemet değerinin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olan en önemli içeriğin hidrojen peroksit olduğu söylenebilir.

### **Fiziksel Özellikleri ile İlgili Sonuçlar**

- Uçucu kül esaslı köpük geopolimerlerin yoğunluk değerleri incelenmiştir. Metakaolen ve uçucu kül yoğunlukları neredeyse aynı olduğundan uçucu kül ve metakaolen miktarındaki değişimler yoğunluğu etkilememiştir.
- Yoğunluk değerleri tüm değişkenler göz önünde bulundurulduğunda en çok hidrojen peroksit miktarına bağlı olarak değişim göstermiştir.
- TSE 13655 standartlarına göre neredeyse tüm numunelerde  $450-550\text{kg/m}^3$  yoğunluk değerlerinde çalışılmıştır. Hidrojen peroksit miktarının %1.5 üzerine çıktığında  $450\text{kg/m}^3$  yoğunluk değerinden daha düşük değerler elde edilmiştir.

### **Isıl İletkenlik Özellikleri ile İlgili Sonuçlar**

- Geopolimer köpük numunelerde 0.12W/mK ısıletkenlik hedeflenmişti. Yapılan çalışmalarda hedeflenen değerin de altına,0.089W/mK ısıletkenlik değerlerine kadar düşülmüştür.
- Isıl iletkenliği değerlerini hidrojen peroksit ve kalsiyum stearat miktarlarındaki artış olumlu yönde etkilemiştir. Artan hidrojen peroksit miktarı ile azalan yoğunluk ve artan kalsiyum stearat ile küçülen gözenek boyutları köpüklerin yalıtım özelliklerini iyileştirmiştir.
- Artan alkali konsantrasyonu, ısıletkenliğin artmasına sebep olmuştur. Bunun alkali konsantrasyonunun yoğunluğu arttırması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- Isıl iletkenliği önemli ölçüde etkileyen bir diğer girdi de perlittir. Çok düşük ısıletkenlik değerlerine sahip olan perlitin geopolimer köpük içine eklenmesi, ısıletkenlik değerlerinin düşmesini sağlamıştır.

### **Kristal Yapısı ve Bağ Özellikleri ile İlgili Sonuçlar**

- Amorf yapıya sahip olan metakaolen ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu hammaddelerinin alkali ortamda geopolimerizasyon reaksiyonuna tabi tutulmasıyla yine amorf bir kristal yapı elde edilmiştir.
- Amorf yapı içerisinde görülen pikler kalıntı kuvars kristaline aittir.
- Değişken molar konsantrasyon, değişken uçucu kül-metakaolen miktarları ve değişken kürlenme sıcaklıkları amorf yapıda yeni kristal fazlar görülmesini sağlamamıştır.
- 80°C'de 10M konsantrasyon ile hazırlanan numunelerde görülen iğnemi yapılar karakterize edilmiştir. Oluşan yapıların sodyum içeriğinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte yüksek miktarda silisyum ve alüminyum içerikleri ile iğnemi yapının oluşmasına etkili olduğu düşünülen az miktarda Fe, Mg, S gibi içerikler de bulunmaktadır. Bu sonuçlar Muduli vd. analiz ettikleri numuneler ile benzerlik göstermektedir (Muduli vd. 2013).
- Değişken molar konsantrasyon, değişken uçucu kül-metakaolen miktarları ve değişken kürlenme sıcaklıkları bağ yapılarını etkilemiştir.
- Karışımdaki uçucu kül miktarının artması Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının titreştiği 1000cm<sup>-1</sup> de titreşen bağların göstergesi olan pik şiddetinin azalmasını sağlamıştır.
- Kürlenme sıcaklığındaki artış Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının pik şiddetlerinin artışı sağlamıştır.

- Alkali karışım konsantrasyonunun artması Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının pik şiddetlerinin artışı sağlanmıştır. Bu durum bağ yoğunluğunun arttığı anlamına gelmektedir. Aynı zamanda molarite artışı ile piklerin tepe noktalarında minör olarak düşük dalga numarasına doğru yönelim tespit edilmiştir. Bu da jel matrikse Na gibi ya da Al gibi mekanik dayanımı etkileyen atomların dahil olduğu anlamına gelmektedir.
- Alkali karışım konsantrasyonunun artışı  $1400\text{cm}^{-1}$ 'de görülen H-O-H pik şiddetini arttırmıştır.
- Kalsiyum stearat miktarı %0.15 iken  $1400\text{cm}^{-1}$ 'de görülen H-O-H piklerinde bir değişim tespit edilmese de %0.75 oranında eklendiğinde pikin kaybolduğu tespit edilmiştir.

### **Kuruma Büzülmesi ile İlgili Sonuçlar**

- Geopolimer kompozisyonlarındaki uçucu kül miktarları göz önünde bulundurulduğunda maksimum %4.053, minimum %1.272 kuruma büzülmesi gözlemlenmiştir.
- Uçucu kül miktarındaki artış kuruma büzülmesini azaltmıştır. Uçucu kül miktarındaki artışın kuruma büzülmesini azaltmasında rol oynayan bir faktörün oluşan gözenek boyutu olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül miktarı arttırılan kompozisyonların gözenek boyutlarının büyüdüğü gözlenmiştir.
- Kuenzel vd 'nin (Kuenzel vd. 2012) uçucu kül miktarındaki artışın yapısal suyu arttırdığı yönündeki görüşü desteklenmemiştir. Bu görüşün aksine uçucu kül miktarının yapısal su üzerinde önemsenir bir etkisi olmadığı düşünülmektedir. Burada etkin olan faktörün metakaolen içeriğidir. Metakaolen içeriği sayesinde artan Al içeriği ve dolayısıyla yapıya bağlı olan  $\text{Na}(\text{H}_2\text{O})$ 'nun kuruma büzülmesini arttırdığı düşünülmektedir.
- Karışım molaritesinin artmasıyla numunelerdeki kuruma büzülmesi miktarının arttığı gözlemlenmiştir. FTIR analizlerinden de görüleceği üzere molarite artışı  $1400\text{cm}^{-1}$ 'de görülen pik şiddetini arttırmaktadır. Bunun Kuenzel vd. nin çalışmalarında bahsettiği yapısal su olduğu ve kuruma sırasında bu suda gerçekleşen kaybın kuruma büzülmesi üzerinde etkin olduğu düşünülmektedir.
- Kalsiyum stearat katkısı kuruma büzülmesini azaltmıştır. Kalsiyum stearat gözenek boyutlarının küçülmesini ve kuruma büzülmesini hızlandıran bir yapı oluşturmaya rağmen suyun yüzeyden uzaklaşmasını zorlaştırmıştır. İkinci olarak ise FTIR

analizinde  $1400\text{cm}^{-1}$ 'de görülen H-O-H pikinin kaybolmasını sağlamıştır. Analiz sırasında  $1400\text{cm}^{-1}$  dalganumarasında titreşen bu su molekülünün kuruma büzülmesinde etkin olduğu düşünülmektedir.

- Perlit ilavesi kuruma büzülmesi üzerinde etkilidir. Perlitsiz numuneler yaklaşık %2.97 oranında kuruma büzülmesi gösterirken perlit ilavesi ile büzülme değerleri kademeli olarak düşmüştür. Minimum kuruma büzülmesi %5.5 perlit içeren numunelerde %1.98 olarak ölçülmüştür.
- Kürlenme sıcaklığındaki artışın köpük geopolimerin kuruma büzülmesini arttırdığı gözlemlenmiştir.

### **Kıvam Özellikleri ile İlgili Sonuçlar**

- Alkali karışımın molaritesinin ve kalsiyum stearat miktarının karışımın kıvamı üzerinde etkin faktörler olduğu anlaşılmıştır.
- Karışım molaritesinin artması ile akış süresi artmış ve yayılma çapı azalmıştır. Daha kıvamlı hale gelen geopolimer çamurunun, artan molarite ile hızlanan geopolimer reaksiyonlarından olduğu tahmin edilmektedir.
- Karışım alkalinitesinin artması ile daha kıvamlı hale gelen geopolimer karışımlarının daha küçük gözeneklere sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Kalsiyum stearat ilavesi akış süresini arttırmış ve yayılma çapını azaltmıştır. Karışımın kalsiyum stearat sayesinde kıvam kazanmasının, bu katkının su itici özelliği ile ilgili olduğu düşünülmektedir.
- Kalsiyum stearat ilavesi, geopolimer köpüklerin gözenek boyutlarını küçültmüştür.
- Karışımındaki uçucu kül miktarının artışı akış süresini azaltmış, yayılma çapını ise arttırmıştır. Buna bağlı olarak da gözenek boyutları irileşmiştir.
- Genleştirilmiş perlit katkısının kıvam özellikleri üzerine etkisinin olup olmadığı incelenememiştir. Kullanılmadan önce suyun içerisinde bekletilip suya doyunlaştırılan perlitlerin su emerek kıvam artışına sebep olması engellenmiştir.

### **Kılcallık ile İlgili Bulgular**

- Kalsiyum stearat katkısı numunelerin kılcallık değerini düşürmüştür. Bu sayede numune içine su girme oranı azalmıştır.

### **Çiçeklenme Problemi ile İlgili Sonuçlar**

- En çok 10M ve 60°C’de hazırlanan numunelerde çiçeklenme görülmüş ve en çok bu numunenin tahrip olduğu gözlemlenmiştir. 6M ve 80°C’de oluşan çiçeklenme probleminin çok daha az miktarda oluştuğu ve numunenin daha az tahrip olduğu gözlemlenmiştir.
- Yüzeyde oluşan tortuların sodyum esaslı olduğu (karbonatlı ve sülfatlı bileşikler) analiz edilmiştir.
- FTIR analizlerinde de molaritenin artması ile 1000cm-1’de görülen pikin hafif de olsa dalga numarasını daha düşük konumlara kaydırıldığı ve Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarını zayıflattığı tespit edilmiştir.

Yapılan tez çalışması kapsamında uçucu kül esaslı geopolimer köpük konusunda araştırmalar yapılmıştır. Geopolimer köpüğün mekanik, mikroyapısal, termal özellikleri incelenmiştir. Bulgular istatistiksel açıdan da değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. İnsan nüfusunun giderek arttığı dünyamızda, insanların temel ihtiyacı olan barınmanın karşılanabilmesi amacıyla yapı malzemesine olan ihtiyaç da artmaktadır. Çimento esaslı yapı malzemelerinin karbon ayak izine sebep olması, tuğla, bims blok gibi yapı malzemelerinin üretimi ile doğanın tahrip edilmesi yeni yapı malzemelerinin gelişmesine yol açmaktadır. Termik santral atığı olan uçucu kül de sahip olduğu kimyasal içerik sayesinde yapı malzemesi olarak değerlendirilmeye müsait bir hammaddedir. Çok düşük sıcaklıklarda üretilebiliyor olması üretim sırasında enerji tasarrufu sağlarken, köpük halinde üretilip binalarda yalıtım özellikli olarak kullanılması ise enerji ihtiyacının azalmasını sağlamaktadır.

Dolayısıyla yapılan bu tez çalışması atıkların döngüsel ekonomi ile değerlendirilmesi konusunu işleme, enerji tasarrufu sağlama (hem üretimde hem kullanım esnasında), karbon ayak izinin az olması ile önem arz eden bir konudur. Geopolimer teknolojisi tüm bu sebepler sayesinde tüm dünyada giderek popülerlik kazanmaktadır.

## 6. KAYNAKÇA

- Abell A B, Willis K L, Lange D A, 1999, Mercury Intrusion Porosimetry And Image Analysis of Cement-Based Materials, *Journal of Colloid and Interface Science*, 211, 39–44.
- Addelman S, Box G E P, Hunter W G, Hunter J S, 1979, *Statistics for Experimenters, Technometrics*, 378p, Boston.
- Ahmaruzzaman M, 2010, A Review On The Utilization Of Fly Ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 327–363.
- Aleem M I A, Arumairaj P D, 2012, Optimum Mix For The Geopolymer Concrete, *Indian Journal of Science and Technology*, 5, 56–58.
- Allahverdi A, Najafi K E, Hossain K M A, Lachemi M, 2014, Methods To Control Efflorescence In Alkali-Activated Cement-Based Materials, In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Woodhead Publishing Limited.
- Álvarez-Ayuso E, Querol X, Plana F, Alastuey A, Moreno N, Izquierdo M, Font O, Moreno T, Diez S, Vázquez E, Barra M, 2008, Environmental, Physical And Structural Characterisation Of Geopolymer Matrixes Synthesised From Coal (Co-)Combustion Fly Ashes, *Journal of Hazardous Materials*, 154, 175–183.
- Aly Z, Vance E R, Perera D S, Hanna J V, Griffith C S, Davis J, Durce, D, 2008, Aqueous Leachability Of Metakaolin-Based Geopolymers With Molar Ratios Of Si/Al = 1.5-4, *Journal of Nuclear Materials*, 37, 172–179.
- Anggarini U, Pratapa S, Purnomo V, Sukmana, N C, 2019, A Comparative Study Of The Utilization Of Synthetic Foaming Agent And Aluminum Powder As Pore-Forming Agents In Lightweight Geopolymer Synthesis, *Open Chemistry*, 17, 629–638.
- Anonim, 2016, *Termik Santrallerden Kaynaklanan Küllerin Yönetimi*, Tübitak MAM ÇTÜE, Ankara.
- Anonim 2017, *Soluble Sodium Silicate Manufacture*, Chemicals and Sodium Silicate, UK.
- Appa R G, 2001, Long-Term Drying Shrinkage of Mortar- Influence of Silica Fume and Size of Fine Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 31, 171–175.
- Arandigoyen M, Bernal J L P, López M A B, Alvarez J I, 2005, Lime-Pastes With Different Kneading Water: Pore Structure and Capillary Porosity, *Applied Surface Science*, 252, 1449–1459.



- Arslan M A, Aktaş M, 2018, İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi, *Journal of Polytechnic*, 900, 299–320.
- ASTM C618, 2001, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- Aydin S, Baradan B, 2012, Mechanical and Microstructural Properties of Heat Cured Alkali-Activated Slag Mortars, *Materials and Design*, 35, 374–383.
- Baetens R, Jelle B P, Thue J V, Tenpierik M J, Grynning S, Uvsløkk S, Gustavsen A, 2010, Vacuum Insulation Panels For Building Applications: A Review and Beyond, In *Energy and Buildings* 42 p, 147–172.
- Bai C, Colombo P, 2017, High-Porosity Geopolymer Membrane Supports By Peroxide Route With The Addition of Egg White As Surfactant, *Ceramics International*, 43, 2267–2273.
- Bakharev T, Sanjayan J G, Cheng Y B, 1999, Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29, 113–120.
- Balaji N C, Mani M, Reddy B V V, 2014, Discerning Heat Transfer In Building Materials, *Energy Procedia*, 54, 654–668.
- Barbosa V F, MacKenzie K J, 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.
- Beck K, Al-Mukhtar M, Rozenbaum O, Rautureau M, 2003, Characterization, Water Transfer Properties and Deterioration In Tuffeau: Building Material In The Loire Valley-France, *Building and Environment*, 38, 1151–1162.
- Bhatt A, Priyadarshini S, Acharath Mohanakrishnan A, Abri A, Sattler M, Techapaphawit S, 2019, Physical, Chemical, and Geotechnical Properties of Coal Fly Ash: A Global Review, *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263.
- Bissonnette B, Pierre P, Pigeon M, 1999, Influence of Key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Materials, *Cement and Concrete Research*, 29, 1655–1662.
- Brew D R M, MacKenzie K J D, 2007, Geopolymer Synthesis Using Silica Fume and Sodium Aluminate, *Journal of Materials Science*, 42, 3990–3993.

- Brito M, Case E, Kriven W M, Salem J, Zhu D, 2007, Developments in Porous, Biological and Geopolymer Ceramics. John Wiley Interscience, 384p, Florida.
- Brooks J J, Megat Johari M A, Mazloom M, 2000, Effect of admixtures on The Setting Times of High-Strength Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 22, 293–301.
- Buchwald A, Hohmann M, Posern K, Brendler E, 2009, The Suitability of Thermally Activated Illite/Smectite Clay as Raw Material For Geopolymer Binders, *Applied Clay Science*, 46, 300–304.
- Buonanno G, Carotenuto A, 1997, The Effective Thermal Conductivity of A Porous Medium With Interconnected Particles, In *International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 40, Issue 2*, pp. 393–405.
- Cilla M S, Morelli M R, Colombo P, 2014, Open Cell Geopolymer Foams By A Novel Saponification/Peroxide/Gelcasting Combined Route, *Journal of the European Ceramic Society*, 34, 3133–3137.
- Collins F, Sanjayan J G, 2000, Cracking Tendency of Alkali-Activated Slag Concrete Subjected To Restrained Shrinkage, *Cement and Concrete Research*, 30, 791–798.
- Collins F, Sanjayan J G, 2001, Microcracking and Strength Development of Alkali Activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 23, 345–352.
- Collins F, Sanjayan J G, 1999, Strength and Shrinkage Properties of Alkali-Activated Slag Concrete Placed Into a Large Column, *Cement and Concrete Research*, 29, 659–666.
- Collins F, Sanjayan J G, 2000, Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 1401–1406.
- Colombo P, Bernardo E, Biasetto L, 2004, Novel Microcellular Ceramics from a Silicone Resin, *Journal of the American Ceramic Society*, 87, 152–154.
- Cui Y, Wang D, Zhao J, Li D, Ng S, Rui Yi, 2018, Effect of Calcium Stearate Based Foam Stabilizer on Pore Characteristics and Thermal Conductivity of Geopolymer Foam Material, *Journal of Building Engineering*, 20, 21–29.
- Davidovits J, 1994, High-Alkali Cements for 21st Century Concretes, in *Concrete Technology, Past, Present and Future*, American Concrete Institute, SP 144, 383-397,
- Davidovits J, 1988, Geopolymers of the First Generation: Siliface-Process, *Geopolymer'88*, 1, 49–67.

- Davidovits J, 2008, Geopolymer Chemistry and Applications. Institut Géopolymère, 585s, Saint Quentin.
- Davidovits, J, 2011, Geopolymer Chemistry and Applications, 3rd Edition, Institut Geopolymere, 585s, pp. 3–14 , Saint-Quentin.
- Davidovits J, 2015, False Values on CO<sub>2</sub> Emission For Geopolymer Cement/Concrete, Scientific Papers, Technical Paper 24, s1-9, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org.
- Davidovts J, 1982, Mineral Polymers and Methods of Making Them, Patent No: US4349386A
- Davies M G, 2006, Building Heat Transfer, Wiley, 512p England.
- De Vargas A S, Dal Molin D C C, Vilela A C F, Silva, F J, Pavão B, Veit H, 2011, The Effects of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers, Cement and Concrete Composites, 33, 653–660.
- Deb P S, Nath P, Sarker P K, 2015, Drying Shrinkage of Slag Blended Fly Ash Geopolymer Concrete Cured At Room Temperature, Procedia Engineering, 125, 594–600.
- Diamond S, 1971, A Critical Comparison of Mercury Porosimetry and Capillary Condensation Pore Size Distributions of Portland Cement Pastes, Cement and Concrete Research, 1, 531-545.
- Dow C, Glasser F P, 2003, Calcium Carbonate Efflorescence on Portland Cement and Building Materials, Cement and Concrete Research, 33, 147–154.
- Ducman V, Korat L, 2016, Characterization of Geopolymer Fly-Ash Based Foams Obtained With The Addition of Al Powder Or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as Foaming Agents, Materials Characterization, 113, 207–213.
- Duran Atış C, Bilim C, Çelik Ö, Karahan O, 2009, Influence of Activator on The Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Mortar, Construction and Building Materials, 23, 548–555.
- Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis J L, Lukey G C, Palomo A, Van Deventer J S J, 2007, Geopolymer Technology: The Current State of The Art, Journal of Materials Science, 42, 2917–2933.

- Duxson P, Lukey G C, Separovic F, Van Deventer J S J, 2005, Effect of Alkali Cations on Aluminum Incorporation In Geopolymeric Gels, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 832–839.
- Duxson P, Mallicoat S W, Lukey G C, Kriven W M, Van Deventer J S J, 2007, The Effect of Alkali and Si/Al Ratio on The Development of Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292, 8–20.
- Duxson P, Lukey G C, Van Deventer J S J, 2007, Physical Evolution of Na-Geopolymer Derived From Metakaolin Up To 1000 °C, *Journal of Materials Science*, 42, 3044–3054.
- Duxson P, Provis J L, 2008, Designing Precursors For Geopolymer Cements, *Journal of the American Ceramic Society*, 91, 3864–3869.
- Eguchi K, Teranishi K, 2005, Prediction Equation of Drying Shrinkage of Concrete Based on Composite Model, *Cement and Concrete Research*, 35, 483–493.
- Elimbi A, Tchakoute H K, Njopwouo D, 2011, Effects of Calcination Temperature of Kaolinite Clays on The Properties of Geopolymer Cements, *Construction and Building Materials*, 25, 2805–2812.
- Fernández-Jiménez A, Palomo, A, 2003, Characterisation of Fly Ashes, Potential Reactivity as Alkaline Cements, *Fuel*, 82, 2259–2265.
- Fernández-Jiménez A, Palomo A, Criado M, 2005, Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model, *Cement and Concrete Research*, 35, 1204–1209.
- Fernández-Jiménez A, Palomo A, Sobrados I, Sanz J, 2006, The Role Played By The Reactive Alumina Content In The Alkaline Activation of Fly Ashes, Microporous and Mesoporous Materials, 91, 111–119.
- Fujiwara T, 2008, Effect of Aggregate on Drying Shrinkage of Concrete, In *Journal of Advanced Concrete Technology* 6, 31-44.
- Galle C, 2001, Effect of Drying on Cement-Based Materials Pore Structure as Identified by Mercury Intrusion Porosimetry A comparative Study Between Oven, Vacuum, and Freeze-Drying, *Cement and Concrete Research*, 31, 1467–1477.

- Giannakou A, Jones M R, 2002, Potential of Foamed Concrete to Enhance the Thermal Performance of Low-Rise Dwellings, *Innovatons and Developments in Concrete Materials and Construction*, 36 533–544.
- Gibson L J, Ashby M F, Gibson L J, Ashby M F, 2014, *Thermal, Electrical and Acoustic Properties of Foams, Cellular Solids*, 308, Cambridge.
- Giesche H, 2006, Mercury porosimetry: A General (Practical) Overview, *Particle and Particle Systems Characterization*, 23, 9–19.
- Gikunoo E, 2004, *Effect of Fly Ash Particles on The Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A535*, University of Saskatchewan, College of Graduate Studies and Research, Master Thesis, 161p, Canada.
- Gonzenbach U T, Studart A R, Tervoort E, Gauckler L J, 2006a, Stabilization of Foams With Inorganic Colloidal Particles, *Langmuir*, 22, 10983–10988.
- Gonzenbach U T, Studart A R, Tervoort E, Gauckler L J, 2006b, Ultrastable Particle-Stabilized Foams, *Angewandte Chemie*, 45, 3526–3530.
- Gonzenbach U T, Studart A R, Tervoort E, Gauckler L J, 2007, Tailoring The Microstructure of Particle-Stabilized Wet Foams, *Langmuir*, 23, 1025–1032.
- Görhan G, 2020, Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 83–89.
- Görhan G, Kahraman E, Başpınar M S, Demir I, 2008, Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 85–94. <http://dergipark.gov.tr/yted/issue/22215/238505>.
- Goto Y, Fujiwara T, 1976, Volumetric Changes of Aggregates By Absorption and Drying, *Japan Society of Civil Engineers Paper Report*, 247, 97-108.
- Granizo M L, Alonso S, Blanco-varela M T, Palomo A, 2002, Alkaline Activation of Metakaolin: Effect of Calcium Hydroxide in the Products of Reaction, *American Ceramic Society*, 85, 225–231.
- Grassl P, Wong H S, Buenfeld N R, 1995, Influence of Aggregate Size and Fraction on Shrinkage Induced Micro-Cracking of Mortar and Concrete, *Japanese Journal of Allergology*, 44, 821–822.

- Güler G, Güler E, Ipekoğlu Ü, Mordoğan H, 2005, Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, 09-12 Haziran 2005, İzmir, 9–12.
- Gunasekara C M, 2016, Influence of Properties of Fly Ash From Different Sources on the Mix Design and Performance of Geopolymer Concrete, RMIT University, College of Science, Engineering and Health, Dostoral Thesis, 244p, Melbourne.
- Gunasekara M P, Law D W, Setunge S, 2014, Effect of Synthesizing Parameters on Workability and Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar, 23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, 9-12 December 2014, Byron Bay, 3, 168–177.
- Guo X, Shi H, Dick W A 2010, Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer, Cement and Concrete Composites, 32, 142–147.
- Habert G, D’Espinoze De Lacaillerie J B, Roussel N, 2011, An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: Reviewing Current Research Trends, Journal of Cleaner Production, 19, 1229–1238.
- Hadi M N S, Zhang H, Parkinson S, 2019, Optimum Mix Design of Geopolymer Pastes and Concretes Cured In Ambient Condition Based on Compressive Strength, Setting Time and Workability, Journal of Building Engineering, 23, 301–313.
- Hajimohammadi A, Ngo T, Mendis P, Sanjayan J, 2017, Regulating the Chemical Foaming Reaction To Control The Porosity of Geopolymer Foams, Materials and Design, 120, 255–265.
- Hansen W, 1987, Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste, Journal of American Ceramic Society, 323–351.
- Hansen W, Almudaiheem J A, 1987, Ultimate Drying Shrinkage of Concrete-Influence of Major Parameters, ACI Materials Journal, 84, 217–223.
- Hardjito D, Wallah S E, Sumajouw D M J, Rangan B V, 2005, Introducing Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Manufacture and Engineering Properties, Our World in Concrete Conference, August, 23–24 2005, Singapore, 271-278.
- Hardjito D, Rangan B V, 2005, Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Research Report GC, Curtin University of Technology, 103p, Australia.

- Ható Z, Makó É, Kristóf T, 2013, Communication: Molecular Simulation Study of Kaolinite Intercalation, *The Journal of Chemical Physics*, 141: 091102.
- Hobbs D W, 1974, Influence of Aggregate Restraint on The Shrinkage of Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 71, 445–450.
- Huang X, Yu L, Li D W, Shiau Y C, Li S, Liu K X, 2015, Preparation and Properties of Geopolymer From Blast Furnace Slag, *Materials Research Innovations*, 19, 413–419.
- Huseien G F, Ismail M, Khalid N H A, Hussin M W, Mirza J, 2018, Compressive Strength and Microstructure of Assorted Wastes Incorporated Geopolymer Mortars: Effect of Solution Molarity, *Alexandria Engineering Journal*, 57, 3375–3386.
- Hüseyin A, 2016, Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 193-203.
- Hyde R, 2000, *Climate Responsive Design- A Study of Buildings in Moderate and Hot Humid Climates*, St Edmundsbury Press, 256p, London.
- Innocentini M D M, Sepulveda P, Salvini V R, Pandolfelli V C, Coury J R, 1998, Permeability and Structure of Cellular Ceramics: A Comparison between Two Preparation Techniques, *Journal of the American Ceramic Society*, 81, 3349–3352.
- Izaguirre A, Lanás J, Álvarez J I, 2009, Effect of Water-Repellent Admixtures on The Behaviour of Aerial Lime-Based Mortars, *Cement and Concrete Research*, 39, 1095-1104.
- Jaya N A, Yun-Ming L, Abdullah M M A B, Cheng-Yong H, Hussin K, 2018, Effect of Sodium Hydroxide Molarity on Physical, Mechanical and Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 343: 012015.
- Jennings H M, 2008, Refinements to Colloid Model of C-S-H in Cement: CM-II, *Cement and Concrete Research*, 38, 275–289.
- Juenger M C G, Winnefeld F, Provis J L, Ideker J H, 2011, Advances in Alternative Cementitious Binders, *Cement and Concrete Research*, 41, 1232–1243.
- Kaplan G, Gültekin A B, 2010, Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel Ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi, *International Sustainable Buildings Symposium*, May 26-28 2010, Ankara.

- Korat L, Ducman V, 2017, The Influence of the Stabilizing Agent SDS on Porosity Development in Alkali-Activated Fly-Ash Based Foams, *Cement and Concrete Composites*, 80, 168–174.
- Krister H, Bo J, Bengt K, Björn L, 2002, *Surfactants and Polymers in Aqueous Solution*, Wiley, 471p, England.
- Kuenzel C, Vandeperre L J, Donatello S, Boccaccini A R, Cheeseman C, 2012, Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking In Metakaolin-Based Geopolymers, *Journal of the American Ceramic Society*, 95, 3270–3277.
- Łach M, Korniejenko K, Miłkula J, 2016, Thermal Insulation and Thermally Resistant Materials Made of Geopolymer Foams, *Procedia Engineering*, 151, 410–416.
- Landi E, Medri V, Papa E, Dedecek J, Klein P, Benito P, Vaccari A, 2013, Alkali-bonded Ceramics With Hierarchical Tailored Porosity, *Applied Clay Science*, 73, 56–64.
- Lee N K, Jang J G, Lee H K, 2014, Shrinkage Characteristics of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Paste and Mortar At Early Ages, *Cement and Concrete Composites*, 53, 239–248.
- Leja J, Prváková S, 2008, Determination of Thermal Properties From Simultaneous Monotonic Cooling and Surface Heat Transfer Measuring, *Thermophysics Proceedings*, October 16-17 2008, Kočovice, 102-110.
- Li C, Sun H, Li L, 2010, A Review: The Comparison Between Alkali-Activated Slag (Si + Ca) and Metakaolin (Si + Al) Cements, *Cement and Concrete Research*, 40, 1341–1349.
- Li N, Shi C, Zhang Z, Zhu D, Hwang H J, Zhu Y, Sun T, 2018, A Mixture Proportioning Method For The Development of Performance-Based Alkali-Activated Slag-Based Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 93, 163–174.
- Li Y, Sun Y, 2000, Preliminary Study on Combined-Alkali-Slag Paste Materials, *Cement and Concrete Research*, 30, 963–966.
- Li Z, Liu S, 2007, Influence of Slag as Additive on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 470–474.
- Livi C N, Repette W L, 2017, Effect of NaOH Concentration and Curing Regime on Geopolymer, *Ibracon Structures and Materials Journal*, 10, 1174–1181.



- Lloyd R R, Provis J L, Deventer J V, 2009, Microscopy and Microanalysis of Inorganic Polymer Cements, 2 : The Gel Binder, *Journal of Materials Science*, 44, 620–631.
- Loewenstein W, 1954, The Distribution of Aluminum in the Tetrahedra of Silicates and Aluminates, *American Mineralogist*, 39, 92–96.
- Lokuge W, Wilson, A, Gunasekara, C, Law D W, Setunge S, 2018, Design of Fly Ash Geopolymer Concrete Mix Proportions Using Multivariate Adaptive Regression Spline Model, *Construction and Building Materials*, 166, 472–481.
- Lowell S, Shields J E, 1991, *Powder Surface Area and Porosity (Third Edition)*, Springer Science+ Business Media, 261p, Hong Kong.
- Lu Z, Zhou X, 2000, Waterproofing Characteristics of Polymer Sodium Carboxymethyl-Cellulose, *Cement and Concrete Research*, 30, 227–231.
- Luikov A V, 1964, Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, *Advances in Heat Transfer*, 1, 123–184.
- Luukkonen T, Abdollahnejad Z, Yliniemi J, Kinnunen P, Illikainen M, 2018, One-Part Alkali-Activated Materials: A Review, *Cement and Concrete Research*, 103, 21–34.
- Ma Y, Hu J, Ye G, 2013, The Pore Structure and Permeability of Alkali Activated Fly Ash, *Fuel*, 104, 771–780.
- Madheswaran C K, Gnanasundar G, Gopalakrishnan N, 2013, Effect of Molarity In Geopolymer Concrete, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 4, 106–115.
- Masi G, Rickard W D A, Vickers L, Bignozzi M C, Van Riessen A, 2014, A Comparison Between Different Foaming Methods For The Synthesis of Light Weight Geopolymers, *Ceramics International*, 40, 13891–13902.
- Mastali M, Kinnunen P, Dalvand A, Mohammadi Firouz R, Illikainen M, 2018, Drying Shrinkage in Alkali-Activated Binders – A Critical Review, *Construction and Building Materials*, 190, 533–550.
- Mataalkah F, Xu L, Wu W, Soroushian P, 2017, Mechanochemical Synthesis of One-Part Alkali Aluminosilicate Hydraulic Cement, *Materials and Structures*, 50, 97.

- Mattila H 2017, Moisture Behavior of Building Insulation Materials and Good Building Practices, Conference: Rakennusfysiikka 2017, October 24-26 2017, Tampere University, 1-8.
- McLellan B C, Williams R P, Lay J, Van Riessen A, Corder G D, 2011, Costs and Carbon Emissions For Geopolymer Pastes In Comparison To Ordinary Portland Cement, *Journal of Cleaner Production*, 19, 1080–1090.
- Medpelli D, Seo J M, Seo D K, 2014, Geopolymer with Hierarchically Meso-/Macroporous Structures From Reactive Emulsion Templating, *Journal of the American Ceramic Society*, 97, 70–73.
- Medri V, Papa E, Dedecek J, Jirglova H, Benito P, Vaccari A, Landi E, 2013, Effect of Metallic Si Addition on Polymerization Degree of In Situ Foamed Alkali-Aluminosilicates, *Ceramics International*, 39, 7657–7668.
- Mehta P K, Povindar K, Monteiro P, 1993, *Concrete : Structure, Properties, and Methods*, McGraw-Hill, Fourth Edition, 450p, New Jersey.
- Migliore M, Corongiu G, Clementi E, Lie G C, 1988, Monte Carlo Study of Free Energy of Hydration For  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{F}^-$ , and  $\text{Cl}^-$  With Ab Initio Potentials, *The Journal of Chemical Physics*, 88, 7766–7771.
- Mo B, Zhu H, Cui X, He Y, Gong S, 2014, Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-Based Geopolymers, *Applied Clay Science*, 99, 144–148.
- Monich P R, Romero A R, Höllen D, Bernardo E, 2018, Porous Glass-Ceramics From Alkali Activation and Sinter-Crystallization of Mixtures of Waste Glass and Residues From Plasma Processing of Municipal Solid Waste, *Journal of Cleaner Production*, 188, 871–878.
- Muduli S D, Sadangi J K, Nayak B D, Mishra B K, 2013, Effect of NaOH Concentration in Manufacture of Geopolymer Fly Ash Building Brick, *Greener Journal of Physical Sciences*, 3, 204–211.
- Mustafa A M, Bakri A, Kamarudin H, Bnhussain M, Nizar I K, Rafiza A R, Zarina Y, 2011, Microstructure of Different NaOH Molarity of Fly Ash- Based Green Polymeric Cement, *Journal of Engineering and Technology Research*, 3, 44–49.

- Nematollahi B, Sanjayan J, 2014, Efficacy of Available Superplasticizers on Geopolymers, *Research Journal of Applied Sciences*, 7, 1278–1282.
- Neto A A M, Cincotto M A, Repette W, 2010, Mechanical Properties, Drying and Autogenous Shrinkage of Blast Furnace Slag Activated With Hydrated Lime and Gypsum, *Cement and Concrete Composites*, 32, 312–318.
- Notario B, Pinto J, Solorzano E, De Saja J A, Dumon M, Rodríguez-Pérez M A, 2015, Experimental Validation of The Knudsen Effect In Nanocellular Polymeric Foams, *Polymer*, 56, 57–67.
- Novais R M, Buruberry L H, Ascensão G, Seabra M P, Labrincha J A, 2016, Porous Biomass Fly Ash-Based Geopolymers With Tailored Thermal Conductivity, *Journal of Cleaner Production*, 119, 99–107.
- Ohji T, Fukushima M, 2012, Macro-porous Ceramics: Processing and Properties, *International Materials Reviews*, 57, 115–131.
- Onoue K, Iwamoto T, Sagawa Y, 2019, Optimization of the Design Parameters of Fly Ash-Based Geopolymer Using The Dynamic Approach of The Taguchi Method, *Construction and Building Materials*, 219, 1–10.
- Özbay E, 2010, Influence of Aggregate Size on The Mechanical and Transport Properties of Concretes and Concrete-Equivalent Mortars, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1303–1314.
- Özgümüş T, Mobedi M, Özkol Ü, 2011, Thermal Dispersion in Porous Media – A Review on Approaches in Experimental Studies, *International Advanced Technologies Symposium*, May 16-18 2011, Elazığ, 266–271.
- Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S, 2008, Alkali-activated Binders: A review of Historical background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, 22, 1305–1314.
- Pacheco-Torgal F, Leonelli A P, Chindaprasirt P, 2015, *Handbook of Alkali Activated Cements, Mortars, and Concretes*, Woodhead Publishing, 855p, United Kingdom.
- Palomo A, Grutzeck M W, Blanco M T, 1999, Alkali-activated Fly Ashes: A Cement For The Future, *Cement and Concrete Research*, 29, 1323–1329.

- Peng M X, Wang Z H, Shen S H, Xiao Q G, Li L J, Tang Y C, Hu L L, 2017, Alkali Fusion of Bentonite To Synthesize One-Part Geopolymeric Cements Cured At Elevated Temperature By Comparison With Two-Part Ones, *Construction and Building Materials*, 130, 103–112.
- Prakouras A G, Vachon R I, Crane R A, Khader M S, 1978, Thermal Conductivity of Heterogeneous Mixtures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21, 1157–1166.
- Provis J L, Duxson P, Lukey G C, Van Deventer J S J, 2005, Statistical Thermodynamic Model For Si/Al Ordering In Amorphous Aluminosilicates, *Chemistry of Materials*, 17, 2976–2986.
- Provis J L, Van Deventer J S J, 2009, *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing, 461p, United Kingdom.
- Prud'homme E, Michaud P, Joussein E, Peyratout C, Smith A, Arrii-Clacens S, Clacens J M, Rossignol S, 2010, Silica Fume As Porogent Agent In Geo-Materials At Low Temperature, *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 1641–1648.
- Pu X, Liu X, Qiu F, Huang L, 2004, Novel Method To Optimize the Structure of Reticulated Porous Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 87, 1392–1394.
- Puertas F, Fernández-Jiménez A, Blanco-Varela M T, 2004, Pore Solution In Alkali-Activated Slag Cement Pastes Relation to the Composition and Structure of Calcium Silicate Hydrate, *Cement and Concrete Research*, 34, 139–148.
- Puertas F, García-Díaz I, Barba A, Gazulla M F, Palacios M, Gómez M P, Martínez-Ramírez S, 2008, Ceramic Wastes as Alternative Raw Materials For Portland Cement Clinker Production, *Cement and Concrete Composites*, 30, 798–805.
- Puertas F, Torres-Carrasco M, 2014, Use of Glass Waste as An Activator in the Preparation of Alkali-Activated Slag, Mechanical Strength and Paste Characterisation, *Cement and Concrete Research*, 57, 95–104.
- Puertas F, Vázquez T, 2010, Early Hydration Cement Effect of Admixtures Superplasticizers, *Materiales de Construcción*, 51, 53–61.
- Qiao J H, Bolot R, Liao H L, Coddet C, 2013, Knudsen effect on The Estimation of The Effective Thermal Conductivity of Thermal Barrier Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 22, 175–182.

- Rangan B V, Hardjito D, Wallah S E, Sumajouw D M J, 2005, Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Proceedings of 4th World Congress on Geopolymer, June 29-30 2005, Saint Quentin, France, 133–137.
- Ranjbar N, Mehrali M, Behnia A, Javadi Pordsari A, Mehrali M, Alengaram U J, Jumaat M Z, 2016, A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer, Plos One, 11: e0147546,
- Razak R A, Abdullah M M A B, Hussin K, Ismail K N, Hardjito D, Yahya Z, 2015, Optimization of NaOH Molarity, Mud/Alkaline Activator, and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH Ratio To Produce Lightweight Aggregate-Based Geopolymer, International Journal of Molecular Sciences, 16, 11629–11647.
- Rees C A, Provis J L, Lukey G C, Van Deventer J S J, 2008, The Mechanism of Geopolymer Gel Formation Investigated Through Seeded Nucleation, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 318, 97–105.
- Ridtirud C, Chindaprasirt P, Pimraksa K, 2011, Factors Affecting The Shrinkage of Fly Ash Geopolymers, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 18, 100–104.
- Rixom M R, Mailvaganam N P, 1999, Chemical Admixtures For Concrete, Taylor and Francis Group, 456p, London.
- Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, Everett D H, Haynes J H, Pernicone N, Ramsay J D F, Sing K S W, Unger K K, 1994, Recommendations for the Characterization of Porous Solids, International Union of Pure and Applied Chemistry, 66, 1739-1758.
- Sakulich A R, Bentz D P, 2013, Mitigation of Autogenous Shrinkage In Alkali Activated Slag Mortars By Internal Curing, Materials and Structures, 46, 1355–1367.
- Scheffler M, Colombo P, 2005, Cellular Ceramics : Structure, Manufacturing, Properties and Applications. Wiley-VCH, 670p, United States.
- Scherer G W, 1988, Aging and Drying of Gels, Journal of Non-Crystalline Solids, 1, 77–92.
- Schramm L L, Stasiuk E N, Marangoni D G, 2003, Surfactants and Their Applications, Annual Reports Section C: Physical Chemistry, 99, 3–48.

- Serdar O, Balko D, Okur S, Semra U, 2010, Preparation and Characterization of Calcium Stearate Powders and Films Prepared by Precipitation and Langmuir-Blodgett Techniques, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49, 1732–1736.
- Shao N N, Zhang Y B, Liu Z, Wang D M, Zhang Z T, 2018, Fabrication of Hollow Microspheres Filled Fly Ash Based Foam Geopolymers With Ultra-Low Thermal Conductivity and Relative High Strength, *Construction and Building Materials*, 185, 567–573.
- Shatat M, Elmer T, Tetlow D, Riffat S, 2015, The State of The Art: Superinsulation Construction Materials Under The UK's Domestic Energy Building: Aerogel and Vacuum Insulation Technology Applications, 14th International Conference on Sustainable Energy Technologies, August 2015, 1–15.
- Shi C, 1996, Strength, Pore Structure and Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars, *Cement and Concrete Research*, 26, 1789–1799.
- Shi C, Day R L, 1996, Some Factors Affecting Early Hydration of Alkali-Slag Cements, *Cement and Concrete Research*, 26, 439–447.
- Shi C, Jiménez A F, Palomo A, 2011, New Cements For The 21st Century: The Pursuit of An Alternative To Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, 41, 750–763.
- Silva P D, Sagoe-Crenstil K, Sirivivatnanon V, 2007, Kinetics of Geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>, *Cement and Concrete Research*, 37, 512–518.
- Škvara F, Svoboda P, Dolezal J, 2008, Geopolymer concrete-an ancient material too? *Ceramics – Silikaty*, 52, 296–298.
- Studart A R, Gonzenbach U T, Tervoort E, Gauckler L J, 2006, Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review, *Journal of the American Ceramic Society*, 89, 1771–1789.
- Sugawara A, Yoshizawa Y, 1961, An Investigation on the Thermal Conductivity of Porous Materials and its Application to Porous Rock, *Australian Journal of Physics*, 14, 469.
- Svingala F R, 2009, Alkali Activated Aerogels. Stress, Rochester Institute of Technology, Rochester, Master Thesis, 71p, New York.

- Szklorzová H, Bílek V, 2008, Influence of Alkali Ions in the Activator on The Performance of Alkali Activated Mortars, Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Traditional Cement and Concrete, 2008, 777–784.
- Tangtermsirikul S, Tatong S, 2001, Modeling of Aggregate Stiffness and Its Effect on Shrinkage of Concrete, *Science Asia*, 27, 185–192.
- Tarameshloo A, Kani E N, Allahverdi A, 2017, Performance Evaluation of Foaming Agents In Cellular Concrete Based on Foamed Alkali-Activated Slag, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44, 894–898.
- Taxiarchou M, Karalis A, Panias D, Panagiotopoulou C, Hicks J K, Dedeloudis C, 2013, Study on the Suitability of Volcanic Amorphous Aluminosilicate Rocks (Perlite) for the Synthesis of Geopolymer-Based Concrete, *Geopolymer Binder Systems*, 6, 1-20.
- Tchakouté H, Rüscher C H, Kong S, Kamseu E, Leonelli C, 2016, Geopolymer Binders From Metakaolin Using Sodium Waterglass From Waste Glass and Rice Husk Ash as Alternative Activators: A Comparative Study, *Construction and Building Materials*, 114, 276–289.
- Thaarrini J, Dhivya S, 2016, Comparative Study on the Production Cost of Geopolymer and Conventional Concretes, *International Journal of Civil Engineering Research*, 7, 2278–3652.
- Trautz A C, 2015, Heat and Mass Transfer In Porous Media Under The Influence of Near-Surface Boundary Layer Atmospheric Flow, Colorado School of Mines, Environmental Engineering Science, Doctoral Thesis, 263p, Colorado.
- Turcinkas S, Feichtensch-Lager B, Albrecht G, Petit P, Gozenbach U, Sturzenegger P, 2018, Inorganic Foam Based Geopolymers, Patent No: WO2018/162416A1.
- Turner L K, Collins F G, 2013, Carbon Dioxide Equivalent (CO<sub>2</sub>-e) Emissions: A Comparison Between Geopolymer and OPC Cement Concrete, *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.
- Van Deventer J S J, Provis J L, Duxson P, 2012, Technical and Commercial Progress In The Adoption of Geopolymer Cement, *Minerals Engineering*, 29, 89–104.
- Van Jaarsveld J G, Van Deventer, J S, Lukey G, 2002, The Effect of Composition and Temperature on The Properties of Fly Ash- and Kaolinite-Based Geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 89, 63–73.

- Van Jaarsveld J G S, Van Deventer J S J, Lukey G C, 2003, The Characterisation of Source Materials In Fly Ash-Based Geopolymers, *Materials Letters*, 57, 1272–1280.
- Vaou V, Panias D, 2010, Thermal Insulating Foamy Geopolymers From Perlite, *Minerals Engineering*, 23, 1146–1151.
- Vijayakumar R M, 2013, Evaluating Shrinkage of Fly Ash-Slag Geopolymers, Graduate College of the University of Illinois, Graduate College, Master Thesis, 55p, Urbana.
- Wallah S E, 2009, Drying Shrinkage of Heat-Cured Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Modern Applied Science*, 3, 14–21.
- Walther B, Feichtenschlager B, Zhou S, 2015, Self Foaming Geopolymer Composition Containing Al Dross, Patent No: WO2015062819A1.
- Wang S D, Scrivener K L, 1995, Hydration Products of Alkali Activated Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, 25(3), 561–571.
- Ward B K, Mohammad M T, Whitney S L, Marchetti G F, Furman J M, 2006, Drying Shrinkage and Creep In Concrete : A Summary, *Journal of Vestibular Research Equilibrium Orientation*, 20, 43–84.
- Weil M, Dombrowski K, Buchwald A, 2009, Life-cycle Analysis of Geopolymers, In *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Elsevier, 194–210, Cambridge.
- Weng L, Sagoe-Crentsil K, 2007, Dissolution Processes, Hydrolysis and Condensation Reactions During Geopolymer Synthesis: Part I-Low Si/Al ratio systems, *Journal of Materials Science*, 42, 2997–3006.
- Xu H, Van Deventer J S J, 2000, The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247–266.
- Yaman, Ö, Şengül Ö, Şelçuk H, Çalikuş O, Kara I, Erdem Ş, Özgür D, 2015, Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri, *IMO Yapı Malzemeleri Komisyonu*, 487, 62–75.
- Yang K H, Song, J K, 2009, Workability Loss and Compressive Strength Development of Cementless Mortars Activated by Combination of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21, 119–127.
- Yang K H, Song J K, Ashour A F, Lee E T, 2008, Properties of Cementless Mortars Activated By Sodium Silicate, *Construction and Building Materials*, 22, 1981–1989.



- Yang T, Zhu H, Zhang Z, 2017, Influence of Fly Ash on the Pore Structure and Shrinkage Characteristics of Metakaolin-Based Geopolymer Pastes and Mortars, *Construction and Building Materials*, 153, 284–293.
- Yang T, Chou C, Chien C, 2012, The Effects of Foaming Agents and Modifiers on a Foamed-Geopolymer. *Advances in Civil, Environmental, and Materials Research*, August 26-30, 2012, Seoul, Korea, 905–914.
- Yao X, Zhang Z, Zhu H, Chen Y, 2009, Geopolymerization Process of Alkali-Metakaolinite Characterized By Isothermal Calorimetry, *Thermochimica Acta*, 493, 49–54.
- Zeybek O. 2009, Uçucu Kül Esasli Geopolimer Tuğla Üretimi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Eskişehir.
- Zhang Z H, Zhu H J, Zhou C H, Wang H, 2016, Geopolymer from Kaolin In China: An Overview, *Applied Clay Science*, 119, 31–41.
- Zhang Z, Provis J L, Ma X, Reid A, Wang H, 2018, Efflorescence and Subflorescence Induced Microstructural and Mechanical Evolution In Fly Ash-Based Geopolymers, *Cement and Concrete Composites*, 92, 165–177.
- Zhang Z, Provis J L, Reid A, Wang H, 2014, Geopolymer foam Concrete: An Emerging Material For Sustainable Construction, *Construction and Building Materials*, 56, 113–127.
- Zhang Z, Wang H, Provis J L, Reid A, 2013, Efflorescence : A Critical Challenge for Geopolymer Applications ?, In *Concrete Institute of Australia's Biennial National Conference*, 16-18 Oct 2013, Gold Coast, Australia.
- Zheng Y C, 2009, Shrinkage Behaviour of Geopolymer, *Engineering - Chemical and Biomolecular Engineering*, Master Thesis, 110p, The University of Melbourne.
- Zhu W, Wei J, Li F, Zhang T, Chen Y, Hu J, Yu Q, 2016, Understanding Restraint Effect of Coarse Aggregate on the Drying Shrinkage of Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 114, 458–463.

## **İnternet Kaynakları**

- 1- <https://acaa-usa.org/about-coal-ash/what-are-ccps/>, 18.04.2019
- 2- [https://www.ytong.si/si/docs/Cenik\\_Multipor\\_2020.pdf](https://www.ytong.si/si/docs/Cenik_Multipor_2020.pdf), 18.07.2019
- 3- [https://www.emo.org.tr/ekler/d6b5c1730d04923\\_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0](https://www.emo.org.tr/ekler/d6b5c1730d04923_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0),  
07.03.2021
- 4- [https://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/456cf38cfd09541\\_ek.pdf?tipi=3&turu=X  
&sube=4](https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/456cf38cfd09541_ek.pdf?tipi=3&turu=X&sube=4) , 14.03.2019
- 5- <http://www.haliccevre.com/images/sempozyum/35.pdf>, 12.08.2020
- 6- [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/EnerjiGorunumu2018\\_1.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/EnerjiGorunumu2018_1.pdf), 12.12.2020

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cansu KURTULUŞ  
Doğum Yeri ve Tarihi : ANKARA,1989  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon / e-posta) :cansu.demir26@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Sincan Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi (2003 –2007)  
Lisans : Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği  
Bölümü, (2008– 2013)  
Yüksek Lisans : Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Malzeme Bilimi ve  
Mühendisliği Anabilim Dalı, (2013 – 2016)  
Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Metalurji ve  
Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, (2017 – 2021)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme  
Bilimi ve Mühendisliği Bölümü (2014 – Devam Ediyor)

### Yayımları (SCI ve diğer) :

Kurtulus R, Kurtulus C, Kavas T, 2021, Physical, Optical, Thermal, Mechanical, and Photon  
Shielding Properties of  $Rb_2O$ -Reinforced  $SiO_2$ - $Na_2O$ - $CaO$ - $MgO$ - $Al_2O_3$  Glass  
System, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32, 7801–7814,

Kurtulus R, Kavas T, Akkurt I, Gunoglu K, Tekin H O, Kurtulus C, 2021, A  
Comprehensive Study on Novel Alumino-Borosilicate Glass Reinforced with  $Bi_2O_3$   
for Radiation Shielding Applications: Synthesis, Spectrometer, XCOM, and MCNP-X  
Works, Journal of Materials Science: Materials in Electronics,

Kavas T, Kurtulus R, Kurtulus C, 2021, Partial Clinker Replacement by Calcined Clays for  
Green Cement Production, Emerging Materials Research, 10, 1-6.

- Kurtuluş C, Kurtuluş R, 2021, Surface Modification of Anhydrous Borax with Stearic Acid by Wet Coating Method, *Journal of Characterization*,1, 1-9.
- Kurtulus C, Kurtulus R, 2021, Synthesis of Wollastonite From Boron Waste and Glass Scraps by Solid-State Reaction, *Journal of Characterization*, 1, 26-33.
- Kurtuluş C, Başpınar M S, 2020, Development of Efflorescence Control Methods of Fly Ash Based Foam Geopolymers, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 20, 129-137.
- Kurtuluş C, Başpınar M S, 2020, Effect of Calcium Stearate on the Thermal Conductivity of Geopolymer Foam, *Journal of Turkish Chemical Society Section A*, 7, 535–544.
- Kurtuluş C, Kara F, 2019, Open Cell Porous Geopolymer Production, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, Special Issue, 155-161.
- Başpınar M S, Kurtuluş C, 2018, Effect of Composition on Geopolymer Foam Concrete Basic Properties, *Afyon Kocatepe University International Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 1, 5-11.