



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAFIF AGREGA KATKILI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE

DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

TURAN ŞEVKİ KÖKER

Temmuz 2019



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAFİF AGREGA KATKILI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE  
DURABİLİTE ÖZELLİKLER

TURAN ŞEVKİ KÖKER

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Temmuz 2019

Turan Şevki KÖKER tarafından Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ danışmanlığında hazırlanan “Hafif Agregalı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Üye : Doç. Dr. Hatice ÇITAKOĞLU, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Ömer Halisdemir  
Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Doç. Dr. Murat BARUT**

**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

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

Turan Şevki KÖKER



## ÖZET

### HAFİF AGREGA KATKILI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLER

KÖKER, Turan Şevki  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Temmuz 2019, 59 sayfa

Bu çalışmada, peletleme yöntemi ile üretilen uçucu kül agregasının geopolimer harç üzerindeki etkileri taze, fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri açısından araştırılmıştır. Bu amaçla, geopolimer harç üretiminde kullanılan 1,2-2,5 mm aralığındaki kuvars agregası %0, %10, %20, %25, %30, %40, %50, %75 ve %100 oranlarında uçucu kül agregası ile ikame edilmiştir. Alkali aktivatör olarak 1/2,5 oranında, 12 molarite NaOH ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisinin bir karışımı hazırlanmıştır. Geopolimer harçlar, 24 saat boyunca 100 °C'lik kürleme sıcaklığına tabi tutulmuştur. Taze halde yayılma çapları ölçülen geopolimer harçların, birim hacim ağırlık, kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık, kuru yüzey doygun özgül ağırlık değerleri tespit edilmiştir. Daha sonrasında ise su emme, porozite, basınç, eğilme, ultrasonik titreşim hızı (UTH) ve kılcal su geçirimsizliği değerleri 1., 7. ve 28. günlerde belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, uçucu kül agregası kullanım oranı arttıkça, geopolimer harcın yayılma çapı artmıştır. Ayrıca, geopolimer harcın, fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri, %25 uçucu kül agregası içeriğine kadar gelişmiştir. Genel olarak, %40 ve daha yüksek oranlarda uçucu kül agregası içeren geopolimer harçlar ise, kontrol harcından daha düşük performans sergilemiştir.

*Anahtar Sözcükler:* Dayanım, durabilite, geopolimer harç, kuvars agregaları, uçucu kül agregası

## SUMMARY

### MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS INCORPORATING LIGHTWEIGHT AGGREGATES

KÖKER, Turan Şevki

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hatice Öznur ÖZ

July 2019, 59 pages

In this study, the effects on geopolymer mortar of fly ash aggregate generated by the pelletizing method were investigated in terms of fresh, physical, mechanical and durability properties. For this purpose, quartz aggregate in the range of 1.2-2.5 mm used in the production of geopolymer mortar was replaced with fly ash aggregate in the ratio of 0%, 10%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 75% and 100%, respectively. A mixture of 12 molar NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solution was prepared in the ratio of 1/2.5 as alkaline activator. Geopolymer mortars were subjected to curing temperature of 100 °C throughout 24 hours. After slump flow diameters were measured in the fresh state, unit weight, dry specific gravity, apparent specific gravity, dry surface saturated specific gravity of geopolymer mortars were determined. Then, water absorption, porosity, compressive, flexural, ultrasonic pulse velocity (UPV) and water sorptivity values of geopolymer mortars were obtained at 1st, 7th and 28th day, respectively. According to the test results, slump flow diameter of geopolymer mortar increased as the usage rate of fly ash aggregate increased. In addition, the physical, mechanical and durability properties of the geopolymer mortar were improved up to 25% fly ash aggregate of replacement ratio. Generally, geopolymer mortars incorporating 40% and higher fly ash aggregate showed lower performance than that of control mortar.

*Keywords:* Strength, durability, geopolymer mortar, quartz aggregates, fly ash aggregate

## ÖN SÖZ

Bu çalışmada, 1,2-2,5 mm aralığındaki kuvarz agregası yerine uçucu kül agregası eklenmesi sonucu elde edilen geopolimer harcın taze, fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Üretilen harçların taze halde iken yayılma çapları, sertleşmiş halde iken standart kür şartlarında deneye tabi tutulduktan sonra 1., 7. ve 28. günlerde fiziksel testler, basınç ve eğilme testleri, ultrasonik titreşim hızı testi ve kılcal su geçirimsizliği testi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, uçucu kül miktarı arttıkça yayılma çapının arttığı tespit edilirken, mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerinin her üç test yaşı için %25 oranına kadar geliştiği belirlenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan çok kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında yardımlarını, bilgilerini, deneyimlerini ve tecrübelerini esirgemeyen çok kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Kasım MERMERTAŞ, Arş. Gör. Osman HANSU, Arş. Gör. Muhammet GÜNEŞ ve Arş. Gör. Şevin EKMEK'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Deneysel çalışmalarım esnasında sık sık yardımlarına başvurduğum çok kıymetli İnş. Yük. Müh. ve aynı zamanda İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi-I Laboratuvarı sorumlusu Sayın Zekeriya KOYUNCU' ya ve İnş. Müh. Dilara TECİMER'e minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi yönden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen canımdan çok sevdiğim başta bu günümü görmesini istediğim ama nasip olmayan rahmetli babam Mehmet KÖKER'e, dualarını hiçbir zaman esirgemeyen annem Hafıza KÖKER'e, benim akademik hayata girmemi çok isteyen amcam Prof. Dr. Ahmet Hulusi KÖKER'e, ablam Servet PİŞMİŞOĞLU'na, halam Perihan KÖKER'e, dayım Nuri HİDAYETOĞLU'na ithaf ediyorum.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ .....	xi
SİMGE VE KISALTMALAR .....	xii
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II GENEL BİLGİLER .....	4
2.1 Geopolimer .....	4
2.1.1 Geopolimer kimyası.....	8
2.2 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Alkali Aktivatörler ve Aktivatör Konsantrasyonu .....	11
2.2.1 Alkali aktivatörler .....	11
2.2.1.1 Sodyum hidroksit (NaOH).....	11
2.2.1.2 Sodyum silikat (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ) .....	11
2.2.1.3 Potasyum hidroksit (KOH) .....	12
2.2.1.4 Sodyum alüminat (NaAlO <sub>2</sub> ).....	12
2.2.1.5 Sodyum sülfat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	12
2.2.2 Aktivatör konsantrasyonu .....	12
2.3 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Atık Malzemeler .....	13
2.3.1 Uçucu küller.....	13
2.3.1.1 Uçucu külün kullanım alanları.....	14
2.3.1.2 Uçucu külün sınıflandırılması.....	16
2.3.1.3 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	17
2.3.1.4 Uçucu küllerin mineralojik ve morfolojik özellikleri .....	17
2.3.2 Metakaolin .....	18
2.3.3 Yüksek fırın cürufu.....	18
2.3.4 Silis dumanı .....	19

2.4 Hafif Agregalar .....	19
2.5 Uçucu Kül ile Hafif Agreganın Üretimi .....	20
2.5.1 Sinterleme metodu .....	20
2.5.2 Otoklav (Hidrotermal) arıtım yöntemi.....	20
2.5.3 Soğuk bağlama (peletleme) yöntemi .....	21
<b>BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>22</b>
3.1 Alkali Aktivatörler .....	22
3.2 Uçucu Kül .....	22
3.3 Agregalar .....	23
3.3.1 Uçucu kül agregası.....	23
3.3.2 Kuvars agregaları .....	24
3.4 Karışım Oranları .....	25
3.5 Karıştırma, Döküm ve Kurlama İşlemi.....	26
3.6 Test Prosedürleri .....	27
3.6.1 Taze özellik (Yayılma çapı).....	27
3.6.2 Fiziksel özellikler.....	28
3.6.3 Mekanik özellikler .....	30
3.6.3.1 Basınç deneyi.....	30
3.6.3.2 Eğilme deneyi .....	30
3.6.3.3 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi.....	31
3.6.4 Durabilite deneyi (Kılcal su geçirimsizliği).....	32
<b>BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>34</b>
4.1 Yayılma Çapı .....	34
4.2 Fiziksel Özellikler.....	35
4.3 Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Ultrasonik Titreşim Hızı .....	40
4.4 Kılcal Su Geçirimsizliği.....	43
<b>BÖLÜM V SONUÇLAR.....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>47</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	<b>59</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal analizi.....	23
Çizelge 3.2. Geopolimer harçta kullanılan malzeme miktarları (kg/m <sup>3</sup> ).....	26
Çizelge 4.1. Geopolimer harcın işlenebilirlik kriterleri .....	34



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. Geopolimer harçların yayılma çapları .....	35
Şekil 4.2. Geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları.....	36
Şekil 4.3. Geopolimer harçların kuru özgül ağırlıkları.....	37
Şekil 4.4. Geopolimer harçların görünür özgül ağırlıkları.....	37
Şekil 4.5. Geopolimer harçların doygun kuru yüzey özgül ağırlıkları .....	38
Şekil 4.6. Geopolimer harçların su emme değerleri .....	39
Şekil 4.7. Geopolimer harçların porozite değerleri.....	39
Şekil 4.8. Geopolimer harçların basınç dayanımları.....	42
Şekil 4.9. Geopolimer harçların eğilme dayanımları.....	42
Şekil 4.10. Geopolimer harçların ultrasonik titreşim hızı değerleri .....	43
Şekil 4.11. Geopolimer harçların kılcal su geçirimliliği değerleri .....	44

## FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Peletleme diskinin genel görünümü .....	23
Fotoğraf 3.2. 1,2-2,5 mm uçucu kül agregası (a), 1,2-2,5 mm kuvars agregası (b), 0,6-1,2 mm kuvars agregası (c) ve 0-0,4 mm kuvarz agregası (d) .....	25
Fotoğraf 3.3. Geopolimer harç hamuru (a), kalıba alınan numuneler (b) ve numunelerin laboratuvar ortamında kür edilmesi (c) .....	27
Fotoğraf 3.4. Yayılma Çapı deneyi; huninin yarısı dolu hali (a), 20 kere şişleme (b), tesviyelenmiş son hali (c) ve yayılma çapı ölçümü (d) .....	28
Fotoğraf 3.5. Numunelerin 24 saat boyunca su içerisinde bekletilmesi (a), numune yüzeylerinin havlu ile kurulanması (b) ve Arşimet terazisi (c) .....	29
Fotoğraf 3.6. Eğilme deneyinde ikiye ayrılan numuneler (a) ve basıç deneyi (b).....	30
Fotoğraf 3.7. 3 noktalı eğilme deneyi (a) ve numunenin kırılması (b).....	31
Fotoğraf 3.8. UTH deneyinin yapılışı .....	31
Fotoğraf 3.9. Kılcal su geçirirmliliği deneyi (a), numunelerin kurulanıp tartılması (b) ve kılcal su geçirirmliliği deney düzeneği (c).....	33
Fotoğraf 4.1. Uçucu kül agregası ve alkali aktivatörler arasında gerçekleştiği tahmin edilen geopolimerizasyon reaksiyonları .....	40

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
Ca	Kalsiyum
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum hidroksit
C-S-H	Kalsiyum-silika-hidrat
CO <sub>2</sub>	Karbon dioksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir oksit
g	Gram
H <sub>2</sub> O	Su
K	Potasyum
KOH	Potasyum hidroksit
M	Molarite
MgO	Magnezyum oksit
NaOH	Sodyum hidroksit
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Sodyum silikat
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sodyum sülfat
Na <sub>2</sub> O- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	Alimino silikat hidrat
NO <sub>2</sub>	Azot dioksit
O	Oksijen
OH	Hidroksit
P	Fosfor
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
SO <sub>2</sub>	Kükürt dioksit
SO <sub>3</sub>	Kükürt trioksit
cm	Santimetre
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre

$\mu\text{m}$	Mikrometre
Si/Al	Silisyum/Aliminyum
w/mk	Isı iletkenlik katsayısı birimi
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece

### **Kısaltmalar**

### **Açıklama**

ASTM	Amerikan Deney ve Malzeme Birlięi
Dk.	Dakika
GH	Geopolimer Harç
K.Y.D	Kuru Yüzey Doygun
MPa	Mega Pascal
MW	Mega Watt
PPM	Toplam madde miktarının milyonda 1 birimlik maddesi
RPM	1 Dakika İçerisinde Gerçekleştirilen Dönüş/Devir Sayısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UTH	Ultrasonik Titreşim Hızı
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Enerjiye duyulan ihtiyaç dünya genelinde her geçen gün büyük oranda artmaktadır. İstatiksel verilere göre; 2007 ile 2030 seneleri arasında enerji ihtiyacının 16,8 milyon ton petrole eşdeğer olması tahmin edilmektedir. Dünya nüfusunun hızla artması ve artan nüfusun yüksek miktarda enerji harcaması bilim adamlarını yeni enerji kaynaklarını bulmaya yöneltmiştir (Torgal vd., 2008). Yenilenebilen enerji kaynaklarının (akarsu, dalga, güneş vb.) miktarı her geçen gün artsa da enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenemeyen fosil yakıtlara gereksinim duyulmaktadır. Fosil yakıtların tüketimi sonucunda atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı artmaktadır. CO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki derişimi 17. yüzyılın sonlarında 280 ppm iken 21. yüzyılda 430 ppm'ye yükselmiştir (Torgal vd., 2008). Dünya genelinde hızla büyümekte olan sektörlerden birisi de inşaat endüstrisidir. Enerji kullanımı ve CO<sub>2</sub> salınımı gibi çevreye etki eden faktörler incelendiğinde büyük bir kısmının inşaat sektörü kökenli olduğu görülmektedir (Torgal vd., 2008).

İnşaat endüstrisinde en fazla üretilen ve kullanılan malzeme portland çimentolu betondur. Beton hammaddesi olan portland çimentosunun üretimi sonucu yüksek miktarda enerji kullanılmakta ve atmosfere CO<sub>2</sub> salınmaktadır. Dünya genelindeki normal portland çimentosu (OPC) üretiminin sera gazı emisyonlarına katkısı yıllık yaklaşık olarak 1,35 milyar ton iken dünyadaki sera gazı emisyonlarının tamamının yaklaşık olarak %7'sini oluşturmaktadır (Malhotra ve Mehta, 2008). Normal portland çimentosunun üretilmesi sonucu, 2020 yılında sera gazı emisyonlarının günümüze göre yarı yarıya artacağı tahmin edilmektedir (Naik, 2005). Bu artışın sonucunda çevre kirliliği sorununun gözle görülebilir oranda yükselmesi beklenmektedir. 50 yıldan daha uzun süreli hizmet ömrü için tasarlanmış birçok yapının, sera gazı etkisinden dolayı 20 ila 30 yıl sonra bozulmaya başladığı bildirilmektedir (Mehta ve Burrows, 2001).

Günümüzde bu problemlere karşı çözüm arayışı ve bilim adamlarının bu konuya olan ilgileri her geçen gün artmaktadır (Url-1). Mehta ve Monteiro (2006); yaptıkları bir çalışmada daha az doğal kaynak, daha az enerji kullanımı ve karbondioksit emisyonunu en aza indirerek çevre dostu beton üretmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmalarını endüstriyel ekoloji olarak kategorize etmişlerdir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak için

portland çimentosu yerine puzolanik atıklar kullanılabilen ve beton üretimi esnasında tercih edilen doğal agregalar atık agregalar ile yer değiştirebilmektedir (Torgal vd., 2008). Beton endüstrisi, cüruf (Malhotra, 2002) ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların geri dönüşümü için yol gösterici olmaktadır.

Sanayisi gelişmiş ülkelerin çoğunda olduğu gibi, Türkiye’de de büyük miktarda atık madde bulunmaktadır. Türkiye’de yıllık uçucu kül ve öğütülmüş granüllü yüksek fırın cürufu üretimi sırasıyla 15 milyon tona ve 600.000 tona ulaşmaktadır. Dünyadaki atık malzemelerin yok edilmesi işlemi çözülmesi en zor konulardan biri olmuştur (Ramachandran, 1981). Bilim adamları atık malzemelerden yararlanarak kullanılabilir malzeme üretiminin yollarını aramaktadırlar. Günümüzde inşaatta kullanılan malzemelerin üretiminde katı atık malzemeler tercih edilmektedir. Bilimsel araştırmacılar yapay agrega üretiminde katı atık malzemeleri kullanmışlardır (Baykal ve Döven, 2000). Atık malzemelerden yapay agrega üretilmesi sonucu yenilenemeyen doğal kaynakların tüketimini azalacak ve doğal agregalara kıyasla daha hafif agrega üretilabilecektir (Kayali, 2008; Sakai ve Noguchi, 2012).

Termik santral atığı malzemelerin alkali aktivatörler ile aktive edilmesi sonucu elde edilen geopolimerler portland çimentolu betona alternatif olan çevre dostu bir malzemedir. Geopolimerler; sera gazı emisyonlarına (Duxon vd., 2007; Xu ve Van Deventer vd., 2002; Zhang, 2015), ve küresel ısınmaya etkisi az (Komnitsas, 2011), enerji gereksinimi ve CO<sub>2</sub> yayılımı düşük (Zhang vd., 2008), geleneksel betona göre daha yüksek mekanik performansa sahip (Torgal vd., 2008), kimyasal ve aşınma direncinin yüksek (Torgal vd., 2008) olmasından dolayı yapı sektöründe alternatif bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül katkılı geopolimer betonun maliyeti portland çimentosu katkılı betonun maliyetinden %10-30 oranında daha azdır ve teknik özellikleri bakımından olumlu gelişmeler göstermektedir (Duxon vd, 2007).

Bu tez çalışmasında peletleme yöntemi ile uçucu külden elde edilen yapay agregalar kullanılarak geopolimer harç üretilmesi amaçlanmıştır. Tez deneysel bir program içermekte olup iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada peletleme yöntemi ile yapay ince agregalar elde edilmiş, ikinci aşamada ise bu agregalar 1,2-2,5 mm aralığındaki kuvars agregasının yerine belirli oranlarda geopolimer harç üretiminde kullanılmıştır.

Bu agreganın geopolimer harç üzerine etkileri taze, mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri açısından araştırılmıştır.



## BÖLÜM II

### GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Geopolimer

Portland çimentolu beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemedir. Portland çimentosu üretimi sırasında kireçtaşının kalsinasyonu ve fosil yakıtın yanması sonucu CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> gibi zararlı gazlar ve toz zerrecikleri atmosfere yayılmaktadır. Çevresel sorunların yanı sıra, Portland çimentosu üretimi esnasında yüksek miktarda enerji harcanmaktadır (Antoni ve Hardjito, 2015). Son yıllarda, portland çimentosunun betondaki kullanımını azaltmak için geopolimer teknolojisi geliştirilmektedir (Davidovits, 2015). Geopolimer, endüstriyel yan ürünleri kullanarak elde edilen betona alternatif bir malzemedir. Geopolimer çeşitlerinin kimyasal yapısına bakıldığında yüksek miktarda Si, Al elementi ihtiva ettikleri, amorf yapıda oldukları ve tekrarlayan 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu halleri organik polimerlere benzediğinden geopolimer adı 1970'li senelerde önerilse de geopolimerin kimyasal yapısına benzer sistemler 1930'lu yıllarda da bilinmekteydi (Erdoğan, 2014). Geopolimerler plastiğe benzer parlak görünümleri ve pürüzsüz yüzeye sahip olmaları polimer olarak adlandırılmasını desteklemektedir. İçerisinde yüksek miktarda toprak minerali olan, termoset polikondensasyonlu tepkimelerle elde edilen polimerle ve fiziksel özellikleri iyi inorganik kimya ürünlerinden oluşan bu ürüne Prof. Dr. J. Davidovits tarafından geopolimer adı verilmiştir. Gerek enerji ihtiyacı gerekse çevreye yararlı malzeme olan geopolimer kullanımını artırmak gerekir. Alkali tuz ile alkali silikatların 750°C'de kalsine edilmiş metakaolinit reaksiyonu sonucu oluşan ürünler geopolimerlerin özelliklerini en iyi gösterdiği durumlardır (Silva ve Crensil, 2008). Reaktif malzeme olan aluminosilikatların güçlü alkali çözeltilerle belirli bir düzende karıştırılıp elde edilen oda sıcaklığında kür edildikten sonra dayanım kazanan geopolimer, basit bir hazırlama yöntemine sahiptir.

Özetle geopolimer malzeme; hidrotermal polikondensasyon reaksiyonu ile oluşan H<sub>2</sub>O'yu fiziksel ve kimyasal yöntemlerle atarak tanecik yapısı olarak zeolit kayaçlarına benzeyen amorf 3 boyutlu heksagonal moleküler bağ yapısından dolayı zeolit kristallerinden ayrılan alümina silikat toprak malzemelere denir (Keyte vd., 2006).

80°C'de reaksiyona girebilir olması zeolitten ayrılan bir diğer özelliğidir. Bu özellik sayesinde bünyesinde bir miktar H<sub>2</sub>O kalabilmektedir (Zeybek, 2009). Geopolimer adı genellikle düşük kalsiyum içeren numunelerde kullanılırken, yüksek kalsiyum içeren cüruf gibi malzemelerin kullanıldığı numunelere alkali aktive denmektedir. Geopolimer üretiminde metal cürufları, asit çözeltileri ve değişik aktivatörler de kullanılmıştır (Erdoğan, 2014; Xu ve Van Deventer, 2002).

Geopolimer üretiminde kullanılan aktivatörün üretilmesi için gereken enerji portland çimentosu üretmek için kullanılan enerjinin yarısı kadardır (Daniel vd., 2006). Ayrıca, geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan uçucu kül portland çimentosundan yaklaşık %10-30 daha ucuzdur (Rangan, 2008). Alkali aktivatörler olarak çoğunlukla NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> gibi alkali çözeltiler kullanılmaktadır. Geopolimerin içeriğinde bulunan Si ve Al çözmede alkali aktifleştiriciler önemli bir rol oynamaktadır. Potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH) ile potasyum silikat gibi alkali özellikleri olan aktifleştiricilerle reaktif özelliğe sahip alümina silikatın karıştırılmasıyla geopolimer elde edilmektedir (Palomo vd., 1999; Somna vd., 2011; Brough ve Atkinson, 2002). Geopolimer harç, alkali aktivatör olan sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımının uçucu kül (Kong ve Sanjayan,2010; Jimenez ve Paloma 2006; Sindhunata vd., 2006), yüksek fırın cürufu (Neupane vd.,2014; Bakharev vd., 1999) ve metakaolin (Davidovits, 1994) gibi silika ve alümina bakımından zengin endüstriyel yan ürünlerle reaksiyona girmesiyle elde edilir. Geopolimerin üretimi esnasında genellikle düşük sıcaklıkta aktive olmuş uçucu kül kullanılmaktadır (Rattanasak ve Chindoprasirt, 2009). Oda sıcaklığında ya da belirli bir sıcaklıkta hazırlanan geopolimer karışımlarında kullanılan uçucu külün ortam sıcaklığındaki tepkimesi daha yavaştır (Samma vd., 2011). Metakaolin ile karıştırılmış uçucu kül de geopolimer için kaynak malzeme olarak kullanılabilir (Zhang vd., 2016; Rajamma vd., 2012). Yüksek fırın cürufu dünya çapında bol miktarda bulunan bir başka atık maddedir ve metalürji endüstrisinin bir yan ürünüdür ve temel olarak kireç ve kalsiyum-magnezyum alüminosilikatlardan oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufunun geopolimer betonda çimento yerine kullanılması CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaktadır (Bakharev vd., 2001). Hidrolik bağlayıcı olarak alkali tuzlarla yüksek fırın cürufunun karışımı sonucunda basınç dayanımı yüksek, esnek, asite karşı direnci yüksek ve erken dayanım kazanmış geopolimer beton üretilmiştir (Zeybek, 2009).

Çimento hidratasyonu sonucunda meydana gelen C-S-H jeli, Ca bakımından yoğun sistemlerde de oluşmaktadır. Geopolimer üretiminde tercih edilen toz bağlayıcı, aktivatör çeşidi ve kürlenme şartlarına göre asit etkisi ve diğer kimyasal etkilere karşı portland çimentosu hamuruna göre dayanımı yüksek, yüksek sıcaklıklara (1100-1200 °C) karşı içyapıda dağılma göstermeden dayanabilen (Erdoğan, 2014), alkali agreganın genişlemesi az, donma-çözülme, sülfat ve korozyona karşı mukavemeti fazla geopolimerler üretilmektedir. Geopolimerlerin dayanımı ve elastik modülüne etki eden parametrelerden biri de bünyesindeki Si:Al oranıdır. Geopolimerik ürünlerin prizinin almasında ve dayanım kazanmasında oda sıcaklığı önemli bir parametredir. Örneğin; oda sıcaklığında 4 saatte 20 MPa yakın dayanım elde eden numuneler vardır. Geopolimer ürünlerin portland çimentolu karışımlarla dayanım olarak kıyaslanabilmesi için 6 saat veya daha fazla süreyle 40-80 °C sıcaklıkta kür işlemine tabi tutulması gerektiği ile ilgili yapılan çalışmalar literatürde daha fazla bulunmaktadır (Paloma vd., 1999; Hardjito vd., 2004).

Geopolimer üretiminde kullanılan aktivatörlerin en uygun derişimi dayanımı artırıcı yönde etki yapmaktadır. En uygun derişimin olumlu etkisinin ötesinde geopolimer içeriğinde bulunan aktifleşmiş matris olan serbest OH<sup>-</sup> iyonu mekanik özelliklere olumsuz yönde etki yapabilmektedir. Geopolimerlerin basınç mukavemetine etki eden diğer parametreler ise yaşı ve kürlenme sıcaklığıdır. Değınilen parametrelerin geopolimer üretiminde etki gösterebilmesi için en uygun aktivatör derişimi deney ortamında olmalıdır (De Vargas vd., 2011). Geopolimer elde etmek için kullanılan bağlayıcıların büzülmesi diğer bağlayıcı malzemelere kıyasla daha az olduğundan iyi bir hacim stabilitesine sahiptir. Priz başladıktan 4 saat sonra nihai basınç dayanımının yaklaşık olarak %70'ine ulaşabilen geopolimer, uzun yıllar dış etkenlere karşı mukavemet gösterir. Ayrıca, yaklaşık 1200 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara hasar görmeden dayanabilen ve 0,24 w/mk-0,3 w/mk arası çok düşük ısı iletkenliğe sahip bir malzemedir (Swanepoel ve Strydom, 2002). İncelemeler sonucunda bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu külün aktivatör olarak NaOH'in daha etkili olduğu görülmüştür (Schmucker ve Mac Kenzie, 2004). NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solüsyonundan oluşan karışımla aktivite edilen geopolimerin daha yüksek dayanıma sahip olduğunu belirtilmiştir (Fernandez-Jimenez vd., 1999; Fernandez-Jimenez ve Palomo 2005; Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2003). Bununla birlikte, NaOH çözeltisinin molaritesi de elde

edilen geopolimerin dayanımını etkilemektedir (De Vargas vd., 2011; HU vd., 2009; Bakharev, 2005).

Sreenivasulu vd. (2016), geopolimer betonun mekanik özelliklerini ince agregaları değişik oranlarda karışıma ekleyerek incelemiştir. Kum ve granit harcı farklı oranlarda karıştırılmıştır (100:0, 80:20, 60:40 ve 40:60). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu 50:50 oranlarında geopolimer bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Oda sıcaklığında 7, 28 ve 90 gün kürlemeden sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı incelenmiştir. Mekanik özelliklerin toplam agrega oranı 60:40 olana kadar arttığı ve 40:60 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.

Mane ve Jadhav (2012); yüksek sıcaklığın farklı özellikteki ince ve kaba agrega katkı uçucu kül geopolimeri üzerindeki etkisini incelemiştir. Granit ve bazalt agregaları kaba agregalar olarak kullanılırken, kırma kum ve nehir kumu ince agregalar olarak kullanılmıştır. Geopolimer üretmek için kaba granit agrega kullanılması bazalt agregaları kullanmaktan daha iyi bir mukavemet göstermiştir. Ayrıca kırma kum, nehir kumu ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanım sağlamıştır.

Nuaklong vd. (2016), kırılmış kireçtaşı agregası ve geri dönüştürülmüş beton agregalarının geopolimer betonun dayanımı ve dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemiştir. Geri dönüştürülmüş beton agregasının geopolimer beton üretmek için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Geri dönüştürülmüş beton agregası içeren geopolimer beton, aynı oranlarda kırılmış kireçtaşı içeren geopolimer betondan %76-93 oranında daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. Ayrıca geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılmasının geopolimer betonun yoğunluğunu %6-10 arasında azalttığı (2160-2210 kg/m<sup>3</sup>) sonucuna varılmıştır. Son olarak, geri dönüştürülmüş beton agregası kullanımının, geopolimer betonda kılcal su geçirimsizliği ve su emme değerlerinin artmasına neden olduğu belirtilmiştir.

Tenn vd. (2015), agrega içeriğinin karıştırılmış geopolimer bağlayıcı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Agregaların reaksiyona dâhil edilmesinin, bağlayıcılar ve agregalar arasındaki reaksiyonlar sonucu malzemelerin özelliklerini değiştirdiği sonucuna varmışlardır. Agregalar ile bağlayıcı arasında boşluklar ve agregaların pürüzlülüğü gibi

aderansı etkileyen çeşitli parametreler (Jahromi, 2009); ara yüzeydeki kimyasal bileşimi (Bagampadde vd., 2006), etkilemiştir.

Özetlemek gerekirse, yüksek miktarda hammadde kaynağı içermesi, CO<sub>2</sub> salınımının, enerji tüketimi ve üretim fiyatının az olması, erken dayanımının yüksek ve hızlı olması sayesinde geopolimer; inşaat, otomotiv, havacılık, metalürji, plastik, endüstrisi, atık yönetim, sanat, dekarasyon, toksik atıkların değerlendirilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

### 2.1.1 Geopolimer kimyası

Alkali silikat ile alkali tuzların endüstri kolunun yan ürünü olan malzemeler (silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül) ve ısıtım işlem uygulanmış (750°C) kaolinit kili (metakaolinit) tarzı alumino-silikat yapıdaki toprak katılar ile düşük ısılarda reaksiyona girmesi sonucu geopolimerizasyon başlamaktadır. Geopolimer malzemelerin fiziksel özelliklerinin katı hammadde karışımı, kimyasal malzemelerin karışım yüzdeleri, kalsinasyon tepkimesinin ısı ve süresi gibi faktörler belirlemektedir (Zeybek, 2009). Ekzotermik kimyasal işlem olan geopolimerizasyon, yoğun alkali koşullarda molekülleri çözme, taşıma, yöneltme ve çoklu yoğunlaşma denilen polikondensasyon hareketlerinden ibarettir (Zeybek, 2009).

Kararlı bileşik olan silikatlardaki (SiO<sub>2</sub>) O<sub>2</sub> atomu ile ısıtım işleme tabi tutulan kilin bünyesindeki alüminatlar arasında elektron geçişleri ile kovalent bağlı bileşik oluşturması olayına geopolimer denmektedir. Geopolimer ana bileşiği Si-O-Al silikatların heliks 3 boyutlu ağ yapısına sahip silikat (SiO<sub>2</sub>) mineralinin alkali aktifleştiricilerle çözünmesiyle meydana gelmektedir (Zeybek, 2009).

Toplam Si:Al molar oranı geopolimer malzeme elde edilirken moleküler yapısını belirlemektedir.

Si:Al=1 ise yangına karşı koruyucu malzeme ve kristal yapısı olarak zeolite benzer tuğla, seramik malzeme üretilebilmektedir.

Si:Al=2 ise seramik amorf yapı arası geopolimer malzeme ile radyoaktif atıkların himayesinde kullanılabilir.

Si:Al=3 ise yüksek sıcaklıklara (1000 °C) mukavemet sağlayan ürünler elde edilmekte ve akıcı polimerik özellik yükselmektedir.

Si:Al>3 ise dolgu malzemesi olarak kullanılan köpükler elde edilmektedir.

Si:Al>15 ise savaş uçaklarında tercih edilebilecek yüksek ısıya ve yangına dayanabilen 2 boyutlu moleküler ağ yapısına sahip geopolimer pasta üretilebilmektedir (Zeybek, 2009).

Geopolimer elde etmek için hazırlanan karışımın içeriğinde alkali tuz olduğu için geopolimerizasyon tepkimesi ekzotermik reaksiyondur. Geopolimer polikondensasyonu işlevine etki eden önemli bir parametre de H<sub>2</sub>O molekülünün dehidratasyonudur. İdeal Al-Si bileşiği içeren ve az miktarda serbest Ca minerali bulduran karışımdaki F tipi uçucu kül veya 750 °C'de ısıtılma tabii tutulmuş metakaolinit hammaddelerin bulunduğu karışımlardan dayanım ve dayanıklılığı yüksek ürünler meydana gelmektedir. Isıtılma tabii olmayan kaolin kilinde basınç dayanımı azdır (Rangan vd., 2005).

Reolojik özellikleri iyi geopolimer malzeme üretmek için karışımda bulunan mineral element ve bileşiklerin enerji seviyesini artırmak ve rahat bir şekilde iyonize olmalarını sağlamak gerekmektedir. Bunu sağlamak için ürün elde etmede kullanılan hammaddelerin boşluk suyunu uzaklaştırmak ve karbonlu bileşikleri ayırmak amacıyla etüv işlevine tabii tutulmuştur (Brew ve Mackenzie, 2007).

Polimerizasyon aşamasını uzatmak için geopolimer karışımlar 40-100°C'de kuru edilmektedir. Bu işlem sonucunda mekanik özellikleri iyi geopolimer malzeme üretilmektedir. Geopolimerlerin kimyasal mekanizma işleyişi ve reaksiyon entalpi değerleri net bir şekilde ifade edilememesinin yanında, metakaolinitin bünyesinde bulunan Si ve Al içeren oksit parçaları 3 boyutlu tetrahedral bağlı termoset polimer mikro moleküler yapıyı meydana getirmesi sonucu camsı-amorf, seramik yapı oluşmaktadır (Komnitsas ve Zaharaki, 2007).

Geopolimer reaksiyonunda kullanılan ve meydana gelen molekül gruplarını Joseph Davidovits şöyle özetler:

a) Si-O-Si-O- siloxo, poly(siloxo) (camsuyu alkalik-silikatlar) bağlayıcılık özelliği sağlayan hammadde

- b) Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- c) Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- d) Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- e) P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- f) P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- g) (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone (Rangan vd., 2005).

Üç boyutlu oligomer makro moleküler yapı oluşana kadar ekzotermik reaksiyon devam etmektedir. Alumino silikat hidratların ısı işlem görmesi sonucu içeriğindeki hidroksil iyonları  $H_2O$  meydana getirecek şekilde ayrılmaktadır. Bunun sonucunda Si-O-Al polimerik bağı elde edilmektedir. Uçucu kül bünyesindeki ana bileşenlerini çözmek için alkali tuzun yanında sodyum silikat ( $Na_2SiO_3$ ) ya da sodyum alüminat ( $Na_2O-Al_2O_3$ ) konmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucu iyi malzeme özelliğine sahip geopolimer üretilmektedir. Kimyasal malzemeleri çözmek için fazla miktarda su kullanmak basınç dayanımını düşürmektedir.

Çoğunlukla geopolimer hamurun pH seviyesi 10-12 aralığında olmaktadır. Geopolimerin dayanım kazandığı aşamada ya da kürlenme sıcaklığı arttığında pH seviyesi azalmaktadır. Örneğin; 85 °C'de pH değeri 10,5 olurken 700 °C'de pH değeri 7,5'dir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan kürlenme işleminde pH seviyesinde denge sağlamak için  $K_2O/SiO_2$  molar oranı yükseltilmektedir.

Çevre ve insan sağlığını korumak için pH düzeyi düşük geopolimer tercih edilmelidir (Zeybek, 2009).

9 çeşit geopolimer malzeme vardır.

- a) camsuyu içerikli geopolimerler polisiloksonat (Si: Al=1:0)
- b) kaolin hidrosodalit içerikli geopolimerler polisialat (Si: Al=1:1)
- c) metakaolinit içerikli geopolimerler poly (sialate-siloxo) (Si: Al=2:1),
- d) kalsiyum içerikli geopolimerler (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3
- e) kayaç içerikli geopolimerler, poly (sialate-multisiloxo) ( $1 < Si: Al < 5$ ),
- f) silika- esaslı geopolimerler, sialate ve siloxo bağlı poly (siloxonate) (Si: Al>5)
- g) uçucu kül esaslı geopolimerler,
- h) fosfat esaslı geopolimerler
- i) organik maden esaslı geopolimerlerdir (Url-2).

## **2.2 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Alkali Aktivatörler ve Aktivatör Konsantrasyonu**

### **2.2.1 Alkali aktivatörler**

#### **2.2.1.1 Sodyum hidroksit (NaOH)**

NaOH, OH<sup>-</sup> iyonunu sağlamak için yaygın olarak kullanılan bir alkali aktivatördür. NaOH molaritesi geopolimer harcın özelliklerini belirler. Yüksek NaOH konsantrasyonları kimyasal çözünmeyi hızlandırırken, bağlayıcı oluşumunda etrenjit ve C-S-H oluşumunu sağlamaktadır (Khale vd., 2007). Daha yüksek bir NaOH konsantrasyonu, reaksiyonun erken aşamalarında daha yüksek mukavemet sağlarken, çözelti içindeki aşırı OH<sup>-</sup> nedeniyle elde edilen geopolimer malzemenin uniform olmayan bir morfolojisine neden olup dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir (Khale vd., 2007). NaOH ile aktive edilmiş geopolimerin kristal yapısının geliştiği, aşırı yoğun sülfat ve asit ortamlarında stabilitesinin korunduğu belirtilmiştir (Criado vd., 2007). NaOH konsantrasyonu ile ısı üretimi arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır (Chareerat vd., 2006).

#### **2.2.1.2 Sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)**

Sodyum silikat veya “camsuyu” olarak bilinen alkali aktivatör; silis kumu (SiO<sub>2</sub>) ve sodyum karbonatla (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 1100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaynatılıp yarı viskoz bir sıvı halinde yüksek basınçlı buharla çözülmesi suretiyle üretilmektedir (Fernandez vd., 2005). Cam suyu tek başına alkali aktivatör olarak nadiren kullanılır, çünkü puzolanik reaksiyonu başlatmak için bünyesinde yeteri miktarda OH<sup>-</sup> iyonu bulunmamaktadır. Alkaniteyi ve dayanımı artırmak ve tepkimeyi başlatabilmek için genellikle NaOH ile birlikte reaksiyona girmektedirler. Bu yüzden geopolimerizasyonda en çok kullanılan alkali aktivatörler, sodyum hidroksit ve sodyum silikattır. (Kong vd., 2010). Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün varlığı, agregalar ve geopolimer harçlar arasındaki ara yüzey bağını iyileştirmektedir (Zhang vd., 2008).

### **2.2.1.3 Potasyum hidroksit (KOH)**

Alkali metal katyonun geopolimer malzeme üzerindeki etkisini incelenmek amacı ile deneysel çalışmalarda sodyum hidroksitin yanında potasyum hidroksit kullanılmaktadır. Alkali aktivatörün içinde bulunan katyon iyonları, hammaddeleri çözmede kullanılır ve bunun sonucunda meydana gelecek ürünlerin özelliklerini etkiler. (Xu ve Van Deventer, 2000; Duxson vd., 2007) KOH/metakaolin ve KOH/uçucu kül karışımları sonucu oluşan kristal yapı, NaOH/metakaolin ve NaOH/uçucu kül karışımları sonucu oluşan kristal yapıdan daha yavaş oluşur (Provis, 2009).

### **2.2.1.4 Sodyum alüminat (NaAlO<sub>2</sub>)**

Sodyum alüminat, geopolimer ürün elde edilirken aktivatör olarak ve bağlayıcı malzeme oluşumunda kullanılmaktadır (Brew ve Mackenzie, 2007).

### **2.2.1.5 Sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)**

Sodyum sülfat, geopolimer üretmek için etkili bir alkali aktivatör olarak kullanılabilir. Su içeriğine bağlı olarak su içermeyen (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve su içeren (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O) olmak üzere iki tür sodyum sülfat vardır. Sodyum sülfat, doğal kaynak olarak veya diğer birçok endüstriyel kimyasal malzemelerden elde edilen bir yan ürün olarak bulunabilmektedir (Provis, 2009).

## **2.2.2 Aktivatör konsantrasyonu**

Alkali aktivatör konsantrasyonu (çözünen aktivatör konsantrasyonu), geopolimer oluşumu ve yüksek basınç dayanımı elde etmek için büyük öneme sahiptir. Aktivatörün konsantrasyonunu belirleyen parametreler ise aktivasyon çözeltisi içindeki aktivatörlerin derişimleridir. Hidroksit iyonunun konsantrasyonu yükseldikçe, aktivatör çözeltisindeki silikat iyonlarının polimerizasyon dereceleri ile aluminosilikatların çözünürlüğü artmaktadır. Çözünebilir aliminyum ile tepkimeye giren küçük monomerik silikatlar, yüksek Ph değerinde aktif durumdadır (Khale ve Chaudhary 2007; Zaharaki vd., 2010). Baskın özelliklere sahip az miktarda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli

içeren geopolimer malzeme üretmek için alkali hidroksit konsantrasyonunu artırmak gerekmektedir (Chareerat vd., 2006).

Geopolimerin yapısındaki C-S-H jeli daha az gözenekli ve boşluklu malzeme oluşturmakta (Pacheco vd., 2007), bunun sonucunda basınç mukavemeti yüksek malzeme meydana gelmektedir. Jel oluşumunu sağlayan diğer bir parametre de çözelti içindeki yüksek sodyum oranıdır (Khale ve Chaudhary, 2007). Geopolimerlere dayanım ve durabilite sağlayan bir diğer jel ise aluminosilikat hidrattır ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ). Üç boyutlu jel aktivatör olarak sodyum kullanıldığı zaman meydana gelmektedir (Ruiz-Santaquiteria vd., 2012). Aktivatör çözeltisine eklenen silisyum geopolimere yapısal kararlılık sağlamaktadır. Yüksek konsantrasyonda silisyum içeren ve 40 °C sıcaklıkta tepkimeye giren geopolimer malzemelerde kür süresinin uzun olması sonucu kristal faz meydana gelmemektedir (Duxon vd., 2007). Yüksek derişimlerde silisyum içeren uçucu kül katkılı geopolimerler yüksek mekanik özelliğe ve küçük gözenekli yapıya sahiptir (Duxon vd., 2007). Alkali konsantrasyonun yükselmesi sonucu elde edilen geopolimer malzemelerin basınç mukavemeti yükselmekte, bununla beraber yüksek OH<sup>-</sup> iyonu konsantrasyonu tepkimenin erken safhalarında düşük basınç mukavemetine sebep olan çökelek haldeki alimino silikat jeli oluşturmaktadır (Somna vd., 2011). Bu nedenle, bir geopolimer karışımı hazırlanırken konsantrasyon açıkça belirtilmelidir.

## **2.3 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Atık Malzemeler**

### **2.3.1 Uçucu küller**

Elektrik üretimi esnasında termik santrallerde kömürün yanması sonucu oluşan, büyük bir miktarı çok ince olan küller, gazlarla birlikte dışarı çıkma eğilimi göstermektedir. Atık malzeme olan bu küle uçucu kül adı verilmektedir. Atık malzeme olan uçucu kül beton içerisinde mineral katkı işlevi görmektedir. Amorf yapıya sahip ve çok ince taneli olduğundan puzolanik bir malzemedir. Bağlayıcı olmadıkları halde nemli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek sertleşen hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip malzemedir (Hamalı, 2007). Termik santrallerde elektrik üretimi esnasında oluşan çok ince taneli uçucu küllerin baca gazları ile birlikte etrafa yayılmasını engellemek için elektro filtreler kullanılmakta ve uçucu küller silolarda muhafaza edilmektedir. Uçucu küllere kıyasla daha ağır olan ve gazlarla birlikte etrafa yayılmayan ocağın alt kısmına

düŖen küle taban külü adı verilmektedir (AruntaŖ, 2006). Enerji ihtiyacının artması, termik santrallerin daha fazla alıŖmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda atık malzeme olan uçucu kül miktarı artmaktadır.

Termik santral atığı olan uçucu külü faydalı hale getirmek için kullanım alanlarının araştırılması gerekirken bu araŖtırmalar istenilen düzeye ulaşamamıştır. Uçucu küller üzerinde yapılan deneysel alıŖmaların istenilen düzeye ulaşamamasının ana nedeni atık malzeme olan uçucu küllerin özelliklerinin homojenlik göstermemesi ve sabit bir değeri olmamasıdır. Başka bir ifadeyle uçucu küllerin özellikleri bulunduğu yöreye göre deęiŖmektedir. Uçucu küller, hangi tip kömürle yakıldığına, hangi derecede öğütüldüğüne, kazan çeşidine, kaç derece sıcaklıkta yakıldığına, hangi yöntemlerle uzaklaştırıldığına ve bu sistemin özelliklerine göre farklılık göstermektedir (Güler vd., 2005). Yaklaşık 1000 Mw'lık termik santralden senelik  $650 \times 10^6$  kg uçucu kül ile taban külü oluşmaktadır. Ortalama 1 Kw'lık termik santralden enerji üretimi esnasında 110 g kül oluşmaktadır. OluŖan atık malzemenin termik santralden dışarı çıkması veya muhafaza edilmesi, maddi zararlar oluşturmasının yanında çevreye de zarar vermektedir (Yazıcı, 2004). OluŖan atık malzemenin bacalarda korunması çevre kirliliğini kısmen azaltmaktadır. Diğer yandan atık malzemelerin depo edilmesi ya da atık malzeme olarak yok edilmesi toz miktarını artırma, hava kirliliği, toprak kirliliği, tarım ürünlerine hasar verme, erozyon vb. doğal afetleri tetikleme gibi problemleri meydana getirebilmektedir (AruntaŖ, 2006).

Günümüzdeki deneysel alıŖmalar incelendiğinde puzolanik özelliğe sahip uçucu külün puzolanik tepkimesini artırmak adına değişik deneysel alıŖmalar yapılmakta bunun sonucunda uçucu kül aktif hale getirilmektedir. Diğer yandan uçucu külün kullanımını artırmak için uçucu kül içerikli yeni malzemelere ve kullanım sahalarına gereksinim vardır (Görhan ve Kürklü, 2014). Uçucu külün kullanım sahasının artması halinde enerji kazancı, ürünlerdeki kalitenin artması ve termik santral atığının faydalı hale getirilmesi ekonomik anlamda yarar sağlamanın yanında, ekolojik dengeyi de koruyacaktır.

### **2.3.1.1 Uçucu külün kullanım alanları**

Termik santral atığı olan uçucu kül mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Çok ince taneli ve amorf yapıya sahip olması puzolanik malzeme özelliği göstermesi ve

tanecik yapısı olarak tek boyutlu küresel oluşu nedeniyle yapı malzemesi olarak tercih edilmektedir. Örnek olarak; uçucu küller tek tip siltli tanecik özelliğine sahip olmasından dolayı sıkıştırılabilmektedir. Ayrıca incelik boyutu göz önüne alınırsa donma-çözülme dayanıklılığı sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde inşaat sektöründe dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir. Karayolu mühendisliğinde stabilize yol yapımında H<sub>2</sub>O ve C tipi kül karışımı ile grouting yapılmakta ve iri agregalar arasındaki bağı güçlendirdiğinden daha sağlam stabilize zemin yapılabilmektedir (Arıöz, 2009).

Uçucu küller, asfalt beton üretiminde filler malzeme olarak kullanılmaktadır. Filler malzeme olarak kullanılmasının sebebi kılcal boşlukları doldurması sonucu daha kompakt bir malzeme oluşumuna katkı sağlamasının yanı sıra asfaltla agrega arasında daha iyi bir bağ meydana getirmesidir. Uçucu külün hidrofobik özelliği asfaltın en üst tabakasının serilmesi esnasında soyulmaya karşı direncin artmasını ve tekerleğin bırakacağı izin belirli oranda azalmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda asfalt beton daha iyi performans göstermektedir (Arıöz, 2009).

Literatürde, uçucu külün, kireç ve kumla karıştırılarak tuğla üretiminde kullanılması üzerine çalışmalar mevcuttur. Ayrıca, uçucu kül, tuf ve kireç karışımı iyi neticeler vermiştir. Uçucu külün kireçle karışımının tuğla üretiminde başarılı sonuçlar verdiği çalışmalar sonucunda tavsiye edilmiştir. Ülkemizde ilk olarak 1967 yılında uçucu kül katkılı tuğla üretilmiş, belirli bir süre çalışmalar durmuştur. 1973 ve 1979 senelerinde uçucu kül ile ateş tuğlası üretilmiştir (Aruntaş, 2006). Uçucu külle beton üretimi 1914 senesinde incelemeye alınsa da çalışmalar 1937 senesinde gerçekleşmiştir (Arıöz, 2009). Pozolanik özelliğe sahip uçucu kül çimento betonda hidratasyon ısısını düşürmektedir. Bağlayıcı özelliğe sahip kalsiyum silika hidratlar (C-S-H jeli) çimento ve uçucu kül içerisindeki kireç bileşeni ve silis taneciklerinin tepkimesi sonucu oluşmaktadır.

Günümüzde beton içerisindeki çimento miktarının yaklaşık %30-40'ı kadar F sınıfı uçucu kül kullanılabilen bu sonucunda beton içerisindeki çimento miktarı azaltılabilmektedir. Deneysel sonuçlarda bu malzemenin basınç dayanımı yükselmiş, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı mukavemeti artmıştır. %60-70 oranında uçucu kül katkılı sıkıştırılmış beton baraj yapımında tercih edilmektedir. Pozzocrete denilen bu

teknik uçucu külün küresel tanecik yapısı sayesinde betonun işlenebilirliğine fayda sağlamaktadır (Arıöz, 2009).

Klinker için gerekli olan silis, uçucu külün kimyasında bulunduğundan dolayı klinker üretiminde uçucu kül kullanılmaktadır. Bunun sonucunda çimentonun özelliklerine olumlu etki yaptığı gibi üretim maliyetini de düşürmektedir. Uçucu külün içeriğinde alkali elementler olduğundan dolayı pH seviyesi ayarlanabilmekte hem de çimentoda gerçekleşebilecek alkali agrega tepkimesi engellenmiş olabilmektedir. Çok ince boyuta (4000-7000 cm<sup>2</sup>/g) sahip olan uçucu kül öğütme işlevine tabi tutulmadan çimento fırınına konmaktadır (Arıöz, 2009). Uçucu küller silis içerdiğinden dolayı gaz beton üretmek için kullanılmaktadır. Plastik ve boya üretiminde filler görevinde kullanılabilir. Uçucu küller hammadde olarak cam-seramik üretmek için tercih edilmektedir. Fenol fermal dehit reçinesi ile karıştırılarak suya karşı mukavemet sağlayan seramiğe benzer malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Pirina ile karıştırılarak ahşaba benzeyen malzeme üretiminde kullanılmıştır (Aruntaş, 2006).

### **2.3.1.2 Uçucu külün sınıflandırılması**

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında kimyasal bileşenlerin oranlarına göre ASTM C 618 (2015) standardı esas alınmaktadır. ASTM C 618'e (2015) göre, uçucu küller F ve C sınıfı olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı %70'den fazla ise F sınıfı uçucu kül, SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamı %50'den fazla miktarda ise C sınıfı uçucu kül adı verilmektedir. F sınıfı uçucu küller, %10'dan daha az CaO içerdiklerinden dolayı bu uçucu küllere düşük kireçli olarak da adlandırılmaktadır. Bu sınıftaki küller puzolanik özellik gösterir. C sınıfı uçucu küller ise %10'dan daha fazla CaO içerdiklerinden dolayı yüksek kireçli uçucu küller olarak da isimlendirilirler. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğinin yanı sıra bağlayıcı özellik de göstermektedirler (ASTM C 618, 2015). TS EN 197-1 (2009) standardına göre uçucu küller silisli (V) ve kalker (W) olarak ikiye ayrılmaktadır. V sınıfı uçucu küller puzolanik özellik gösterir, reaktif silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ve alüminyum oksitten (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) meydana gelmektedir. Bu külün, reaktif kireç (CaO) yüzdesi %10'dan düşük ve reaktif silis yüzdesi %25'den yüksektir. W sınıfı uçucu kül ise puzolanik özelliğinin yanı sıra kendi başına bağlayıcılık özelliğine sahiptir. İçerisinde reaktif CaO, reaktif SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunmaktadır. Siliko alüminöz uçucu küller ise CaO ve sülfat (SO<sub>3</sub>) değerleri dikkate

alınarak, çoğunlukla taş kömüründen oluşan ana maddesi siliko alüminatlardan meydana gelen küllerdir. Linyit kömüründen oluşan uçucu küller iki kısımda incelenmektedir. Yüksek miktarda  $SO_3$  ve CaO'den oluşan küllere sülfakalsik uçucu kül, kireç ile silika değerleri fazla olan küllere silikokalsik uçucu kül denilmektedir (Görhan ve Kürklü, 2008). Bu sınıflandırmalara ek olarak CaO değerine göre de sınıflandırılabilir. CaO miktarı uçucu külün aktivitesini belli etmektedir.  $CaO < 3,5$  ise çok düşük aktiviteli kül,  $3,5 < CaO < 7$  ise düşük aktiviteli kül,  $7 < CaO < 14$  ise aktif kül ve  $CaO > 14$  ise çok aktif kül diye sınıflandırılmaktadır (Yazıcı, 2004).

### **2.3.1.3 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri**

Uçucu külün fiziksel özelliği, hangi termik santralden elde edildiğine ve reaksiyonda kullanılan kömürün özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Renkleri karbon miktarına bağlı olarak açık griden koyu griye kadar değişmektedir. Genellikle %60-90 camısı özelliğe sahip taneciklerden oluşur ve amorf yapıdadır. Tane boyutu olarak küresel şekilli katı parçacıklardır ve 1-200  $\mu m$  çaplarındadırlar. Normal şartlarda 2,2-2,7  $g/cm^3$  yoğunluğa sahiptir (Aruntaş, 2006).

### **2.3.1.4 Uçucu küllerin mineralojik ve morfolojik özellikleri**

Mineralojik yapılarından dolayı uçucu küller puzolanik özelliklere sahiptir. Uçucu küller puzolanik özelliği sayesinde sönmüş kireç ( $Ca(OH)_2$ ) ile nemli ortamda tepkimeye girmektedirler. Yüksek kireçliler puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcılık özelliği de göstermektedirler (Aruntaş, 2006). Uçucu kül tanecikleri, senosfer denilen içi boşluksuz veya boşluklu şeklinde, plerosfer denilen büyük küre içerisinde küçük küreler içeren yapılar, şekilsiz boşluklar içeren yüzeye düzensiz dağılmış yapılar, yüzeyde sıvı partikülleri olan yapılar, kristal kaplı yüzeye sahip yapılar, deformasyon yapmış yapılar, yüzey görünümü olarak şekilsiz birikimli yapılar gibi değişik hallerde bulunmaktadırlar. Kömürün öğütülme derecesi ve uçucu külün bacadan çıkmasına engel olmak için kullanılan yöntem uçucu külün inceliğini belli etmektedir. Uçucu külün tanecik boyutu ve özgül yüzeyi sırasıyla, 0,5-200  $\mu m$  ve 4000-7000  $cm^2/gr$  aralığındadır. Uçucu külün özgül ağırlığı ise 2,2-2,7  $gr/cm^3$  aralığındadır (Görhan vd., 2008).

### 2.3.2 Metakaolin

Yüksek miktarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeren, sinterleme işlemi sonucunda bünyesindeki kristal yapılar bozularak amorf yapıya dönüşen metakaolin, kaolin kilinin kalsine olmasıyla üretilen alimino silikattır. Endüstriyel atık veya yan sanayi ürünü olan puzolanlar yüksek performanslı beton üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Puzolanik malzeme olan metakaolin bu amaçla ilk kez 1962’de Jupia Barajı inşaatında puzolan olarak beton karışımına katılmıştır.  $200^\circ\text{C}$ ’nin altında ısıtılınca hidroskopik suyunu kaybeden kaolin kili,  $500-600^\circ\text{C}$ ’de kimyasal bağ suyunu bırakarak metakaolinin temel ögesi olan metakaolinite dönüşür.  $1000^\circ\text{C}$  sıcaklığa tabi tutulan kaolin kili mullit ve kristobalite dönüşür ve reaktif özelliğini kaybeder. Sinterleme işlemi sonucunda amorf yapılı ve yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip metakaolin oluşur. Metakaolinin bünyesindeki mineral içeriği, kullanılan ham kaolinin kaynağı ile üretim koşullarına bağlı olarak metakaolinin reaksiyon kapasitesi belli olmaktadır (Vu, 2002). Metakaolinin bünyesinde yüksek miktarda bulunan silis ile çimento hidratasyonu ürünü olan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ’in tepkimesi sonucu oluşan C-S-H jeli, metakaolin katkılı beton ve harçların mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Yazıcı vd., 2010; Görhan ve Kürklü, 2008).

### 2.3.3 Yüksek fırın cürufu

Granüle yüksek fırın cürufu, demir üretimi için kullanılan demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlardan açığa çıkan yan üründür. Yüksek fırınlarda demir üretmek için silis, kükürt ve alümin içeren demir cevheri, yardımcı hammadde olarak kireçtaşı ve yakıt olarak kok kömürü kullanılmaktadır.  $1500^\circ\text{C}$  sıcaklıkta yüksek fırında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda erimiş demir ve erimiş cüruf meydana gelmektedir (Siddique ve Klaus, 2009; Hiraskar ve Patil, 2013; Hosseini vd., 2016). Yüksek sıcaklık sonucu hafif ağırlıklı eriyik cüruf eriyik demirin üst kısmında yüzmektedir. Erimiş cürufun yüksek basınçlı su jetleri vasıtasıyla hızlıca söndürülmesi sonucu 5 mm çaptan daha küçük granüle cüruf oluşmaktadır. %95’e yakın kristal olmayan kalsiyum aluminosilikat içeren granüle malzeme üretmek ve kristal oluşumunu önlemek için hızlı soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. İşlenebilirlik özelliğini artırmak için kurutma işlemine tabi tutulan granüle cüruf, dönen bilyeli öğütücü içinde öğütülerek çok ince toz haline getirilir. Oluşan bu ürüne öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu denir. Eriyik

cürufu soğutmak için kullanılan yöntemlere göre genişmiş veya köpük cüruf, peletlenmiş cüruf, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu ve granüle yüksek fırın cürufu oluşmaktadır. Geleneksel portland çimentosu ile farklı oranlarda aynı kimyasal bileşenlere sahip olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, esas olarak CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO içermektedir.

#### **2.3.4 Silis dumanı**

Endüstriyel yan ürün olan silis dumanı, silisyum metali veya demir-silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında 2000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda elektrik ark fırınlarında yüksek kuvarsın indirgenmesi sonucu oluşan ana bileşeni 1 µm'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO<sub>2</sub>) partiküllerinden oluşan yüksek seviyede puzolanik bir malzemedir (Chung, 2002). Çok yüksek özgül yüzey alanına sahip (15.000-25.000 m<sup>2</sup>/kg), çok ince taneli (ortalama çapı 0,15 µm), amorf yapıda ve yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içerdiğinden dolayı, son derece reaktif puzolanik bir malzemedir. Birçok olumlu özelliğe sahip olan silis dumanının, çok ince ve yoğunluğu düşük malzeme olmasından dolayı taşınması, işlenmesi ve depolanması zorluklara neden olmaktadır (Pedro vd., 2017). Çok yüksek miktarlarda SiO<sub>2</sub>'den (%90'dan fazla) oluşan silis dumanı düşük miktarlarda demir, magnezyum ve alkali oksitler içermektedir (Siddique ve Klaus, 2009).

#### **2.4 Hafif Agregalar**

Hafif agregalar, 1200 kg/m<sup>3</sup>'ü geçmeyen kuru yoğunluğa veya 2000 kg/m<sup>3</sup>'ü geçmeyen partikül yoğunluğuna sahip olan tanecikli malzemelerdir. Bazı hafif agregalar doğal olarak bulunur iken, bazıları da yapay olarak üretilmektedir (Gonzalez-Corrochano vd., 2009). Hafif agregalar genellikle üretim süreci ve yöntemine göre sınıflandırılmaktadır. Doğal hafif agregalar genellikle volkanik bazdadır ve bu yüzden dünyanın sadece belirli bölgelerinde bulunmaktadır. Yapay agregalar, endüstriyel cam, uçucu kül ve cüruf gibi ürünlerden üretilmektedir (Baykal ve Döven, 2000; Videla ve Matinez, 2002; Kim vd., 2005; Gesoğlu vd., 2012). Hem doğal hem de yapay olan agregalar, ASTM C 330 (2009) şartlarını yerine getirmelidir.

## **2.5 Uçucu Kül ile Hafif Agregası Üretimi**

Uçucu külün beton teknolojisinde kullanımı 1930'lara kadar uzanmaktadır (Şengül, 2011). Her yıl dünya genelinde yaklaşık 450 milyon ton uçucu kül üretildiği tahmin edilmektedir, ancak toplam miktarın sadece %6'sı beton karışımlarında puzolan olarak kullanılabilir (Baker, 1984). Türkiye'de yılda yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül üretimine sahip 12 tane termik santral bulunmaktadır. Hafif agregası üretimi için uçucu kül kullanılmasının temel amacı, atık malzemelerin geri dönüşümü için uygun bir yoldur. Uçucu kül ile hafif agregası üretimi, sinterleme, otoklavlama ve soğuk bağlama yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir (Baykal ve Döven, 2000). Soğuk bağlama yönteminde düşük enerji tüketildiğinden daha ekonomik bir işlemdir.

### **2.5.1 Sinterleme metodu**

Endüstriyel fırınlarda agregası yakma işlemine vitrifikasyon denir. Yapay hafif uçucu kül agregaları sinter kordonu kullanılarak üretilir. İlk başta killi uçucu kül su ile karıştırılır ve topak haline getirilir. Daha sonra 1100°C'de ızgarada veya sinterleme teli üzerinde ısıya tabi tutulur. Peletler; uçucu kül hafif agregası üretilene kadar kurutma, öğütme, sinterleme ve soğutma işlemlerinden geçirilir. İşlemin sonunda peletler doğal veya mekanik yollarla ayırt edilir. 2.5 mm elekten geçen agregalar ayırt edilir, 2.5 mm elek üzerinde kalan diğer agregalar ise hafif beton üretiminde kullanılır (Güneyisi vd., 2013; Koçkal ve Özturan, 2010).

### **2.5.2 Otoklav (Hidrotermal) arıtım yöntemi**

Hidrotermal işlem olan otoklavlama yöntemi, uçucu külün peletleri doymuş buharla kürlenme yapılarak sertleştirilmesidir. Otoklav yöntemiyle kül agregası üretilirken %45 kuvars kumu, %47 uçucu kül, %4,5 kireç, %2 katkı maddeleri ve %1,5 su kullanılmaktadır. Tüm karışım pelet haline getirilir ve sonra yüksek nemde kızdırılır. Tuğla üretiminde de kullanılan hafif agregaları üretmek için 200 °C'de 6,5 saat ısıya tabi tutulur (Koçkal and Özturan, 2010).

### **2.5.3 Soğuk bağlama (peletleme) yöntemi**

Soğuk bağlama yöntemi, uçucu külün ortam sıcaklığında kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesini açıklayan bir yöntemdir. Uçucu kül hafif agregasının ana üretim sürecinde, uçucu kül, Portland çimentosu ve suyun karışımı sonucu pelet haline getirilir ve birkaç gün boyunca kürlenir (Öz vd., 2017).



## BÖLÜM III

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada peletleme yöntemi ile elde edilen hafif agregalar kullanılarak geopolimer harç üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla uçucu külün yanı sıra, alkali aktivatörler (NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), farklı çaplarda kuvarz agregaları (0-0,4 mm; 0,6-1,2 mm; 1,2-2,5 mm) ile peletleme yöntemi ile elde edilen 1,2-2,5 mm aralığında uçucu kül agregası kullanılmıştır. Reaksiyonlar sonucu elde edilen geopolimer harcın fiziksel özelliklerinin yanı sıra mekanik ve durabilite özellikleri de incelenmiştir.

#### 3.1 Alkali Aktivatörler

Alkali aktivatörler Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile 12 M NaOH çözeltisinin bir karışımından meydana gelmiştir (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH = 2,5). Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve Pelet halindeki NaOH Kayseri'deki bir firmadan solüsyon halinde temin edilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisinin bileşimi kütlece, %29,4 SiO<sub>2</sub>, %14,7 Na<sub>2</sub>O ve %59,9 sudan meydana gelmektedir. Alkali çözelti tüm karışımlardaki tek sıvı bileşendir. 12 M NaOH solüsyonu hazırlamak için, 12x40 = 480 gram katı sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin moleküler ağırlığı 40'tır.

#### 3.2 Uçucu Kül

Tez çalışmasında uçucu kül, alkali aktivatörler ile birlikte geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül İSKEN Sugözü Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Uçucu kül ASTM C618 (2015) standartlarına göre F sınıfına girmektedir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

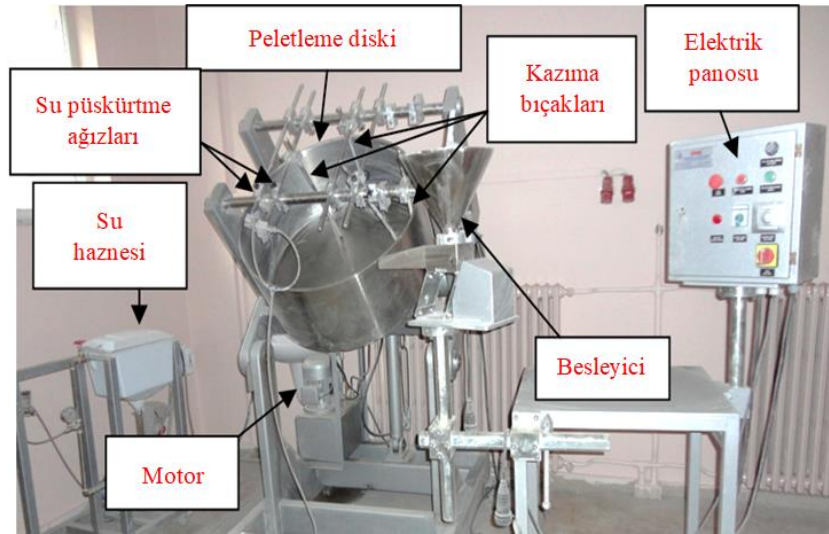
**Çizelge 3.1.** Uçucu külün kimyasal analizi

Kimyasal Analiz (%)	Uçucu Kül
CaO	1,47
SiO <sub>2</sub>	61,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,02
MgO	1,70
SO <sub>3</sub>	0,06
K <sub>2</sub> O	2,34
Na <sub>2</sub> O	0,27
TiO <sub>2</sub>	0,90
Fiziksel Özellikler	Uçucu Kül
Kızdırma Kaybı (%)	2,60
Özgül Ağırlık	2,31

### 3.3 Agregalar

#### 3.3.1 Uçucu kül agregası

Geopolimer üretiminde değişik çaplarda kuvarz agregası ile uçucu kül agregası olmak üzere iki tip agrega birlikte kullanılmıştır. Uçucu kül hafif agregaları soğuk bağlama yöntemi kullanılarak Fotoğraf 3.1’de görülen peletleme diski yardımıyla üretilmiştir (Öz, 2014).



**Fotoğraf 3.1.** Peletleme diskinin genel görünümü (Öz, 2014)

Peletleme diski; hız kontrol ünitesi, basınçlı su enjeksiyon sistemi ve peletleme tamburu olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Daha homojen ve farklı çaplarda agrega üretilmesi için diskin içinde enerji bariyeri oluşturan bıçaklar da mevcuttur (Baykal ve Döven, 2000). En ideal üretim için disk düzlemi ve normal arasındaki açı, diskin dönme hızı ve karışıma eklenen su miktarı oldukça önemlidir. Optimum dönme hızı ve diskin eğim açısı arasındaki ilişkiyi bulmak için bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, 80 cm çapa ve 35 cm derinliğe sahip olan peletleme tamburu için optimum dönme hızı ve diskin eğim açısı sırasıyla, 42 rpm ve 45 °C olarak bulunmuştur (Öz, 2014).

Üretim aşamasında ilk olarak uçucu kül ve Portland çimentosunun kuru karışımı sırasıyla %90 ve %10 ağırlık oranlarında karıştırılmıştır. Peletleme işlemi yaklaşık 20 dakika sürmektedir. Peletleme tamburuna eklenen kuru karışım üzerine yaklaşık 10 dk boyunca, basınçlı su enjeksiyon sistemi vasıtasıyla, bağlayıcı karışımının ağırlıkça %22'si kadar su eklenmiştir. Kalan süre, yeni oluşturulmuş peletlerin çaplarının genişletilmesi ve sertleştirilmesi için ayrılmıştır. Elde edilen taze peletler %70 bağıl nem ve 20°C sıcaklıkta 28 gün boyunca kendiliğinden sertleşmek üzere kapalı plastik torbalarda bekletilmişlerdir (Gesöglü vd., 2012a). Son aşamada ise, sertleştirilmiş uçucu kül agregalarından, uygun elekler yardımıyla 1,2-2,5 mm arasında olanlar hafif ince agrega olarak ayrılmıştır. Hafif agregalar için özgül ağırlık ve su emme kapasitesi ASTM C 127'ye (2007) göre belirlenmiştir. İnce agreganın kuru, görünür ve doymuş yüzeydeki özgül ağırlıkları sırasıyla 1,46, 2,10 ve 1,76 olarak belirlenmiştir. Su emme değeri ise %21,2'dir. Üretilen uçucu kül agregasına ait resim Fotoğraf 3.2'de gösterilmiştir.

### **3.3.2 Kuvars agregaları**

Geopolimer harç üretiminde 0-0,4 mm, 0,6-1,2 mm, 1,2-2,5 olmak üzere üç farklı çapta kullanılan kuvars agregaları Fotoğraf 3.2'de verilmiştir. Agregaların özgül ağırlıkları 2,65'tir.



**Fotograf 3.2.** 1,2-2,5 mm uçucu kül agregası (a), 1,2-2,5 mm kuvars agregası (b), 0,6-1,2 mm kuvars agregası (c) ve 0-0,4 mm kuvartz agregası (d)

### 3.4 Karışım Oranları

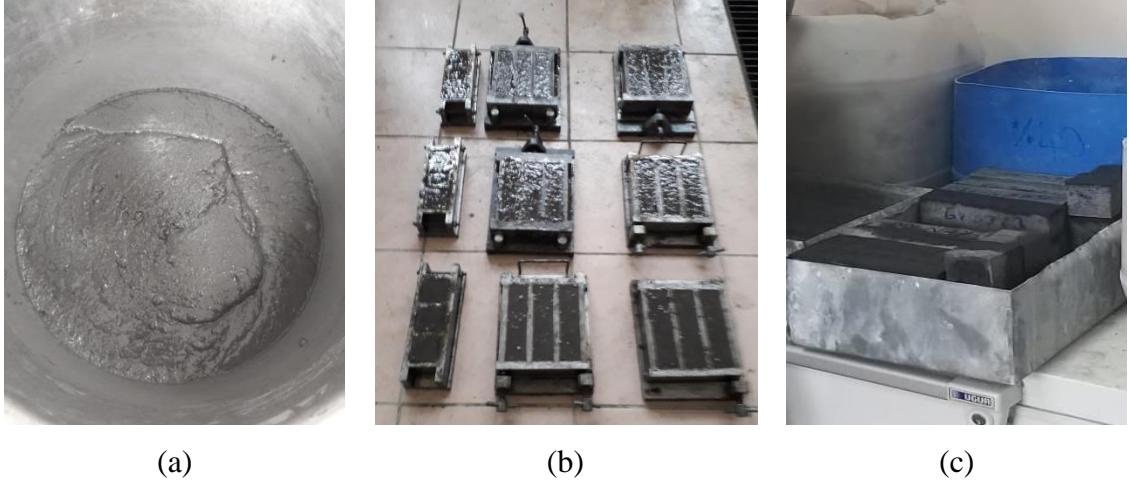
9 adet geopolimer harç karışımı; geopolimer harcın taze ve sertleşmiş özelliklerini belirlemek için  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5$  olacak şekilde, sabit uçucu kül içeriği ile tasarlanmıştır. Geopolimer harcın karışım oranları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Karışımlardaki bağlayıcı içeriği; alkali çözeltiler ve uçucu küldür. Seçilen bağlayıcı içeriği  $1000 \text{ kg/m}^3$ ’tür. Alkali çözeltinin bağlayıcıya oranı 0,33 olarak kabul edilmiştir. Geopolimer harç üretiminde kuvars agregaları (0-0,4; 0,6-1,2; 1,2-2,5 mm ) ile uçucu kül agregası (1,2-2,5) mm olmak üzere iki çeşit agrega kullanılmıştır. İlk olarak tamamı değişik çaplarda kuvars agregaları içeren kontrol karışımı (GH0) tasarlanmıştır. Daha sonra 1,2-2,5 mm aralığındaki kuvars agregası yerine ağırlıkça %10, %20, %25, %30, %40, %50, %75 ve %100 oranlarında 1,2-2,5mm aralığında uçucu kül agregası karışımlara eklenerek sırasıyla, GH10, GH20, GH25, GH30, GH40, GH50, GH75 ve GH100 karışımları elde edilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Geopolimer harçta kullanılan malzeme miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Kod	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Uçucu Kül	Kuvars Agregaları			Uçucu Kül Agregası 1,2-2,5
				0-0,4 (%45)	0,6-1,2 (%35)	1,2-2,5 (%20)	
GH0	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	253,9	-
GH10	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	228,5	16,9
GH20	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	203,1	33,7
GH25	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	190,4	42,2
GH30	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	177,7	50,6
GH40	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	152,3	67,4
GH50	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	126,9	84,3
GH75	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	63,5	126,5
GH100	95,2	238,1	666,7	571,2	444,2	-	168,6

### 3.5 Karıştırma, Döküm ve Kürleme İşlemi

İlk olarak karışıma eklenecek uçucu kül agregaları karışımdaki su miktarını etkilememeleri için 24 saat boyunca suda bekletilmiştir. 24 saat sonunda agregalar sudan çıkartılmış ve yüzeyleri fön makinesi yardımıyla kurutulup, doygun kuru yüzey durumu getirilmiştir (Öz, 2014). Doygun kuru yüzey durumundaki uçucu kül agregaları belirlenen oranlarda 1,2-2,5 mm çap aralığındaki kuvars agregası yerine karışıma eklenmiştir. İlk olarak uçucu kül agregasız kontrol harcı hazırlanmıştır. Bu karışımda uçucu kül ve farklı çaplardaki kuvars agregaları mikserde karıştırıldıktan sonra beherde karıştırılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışıma eklenmiştir. Son aşamada geopolimer harç 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen taze geopolimer harç (Fotoğraf 3.3 (a)) üzerinde yayılma çapı deneyi yapılmıştır. Sonrasında geopolimer harç uygun vibrasyon işlemi kullanılarak kalıplara alınmıştır (Fotoğraf 3.3 (b)). 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen numuneler eğilme dayanımı, basınç dayanımı, UTH ve özgül ağırlık deneylerinde kullanılmıştır. 50x50x50 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen numuneler ise kılcal su geçirimliliği deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra bütün geopolimer harç karışımları, 24 saat boyunca 100 °C kürleme sıcaklığı altında etüvde bekletilmiştir. Kürleme işleminden sonra örnekler kalıplardan çıkarılmış ve belirlenen test zamanına kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir (Fotoğraf 3.3 (c)).

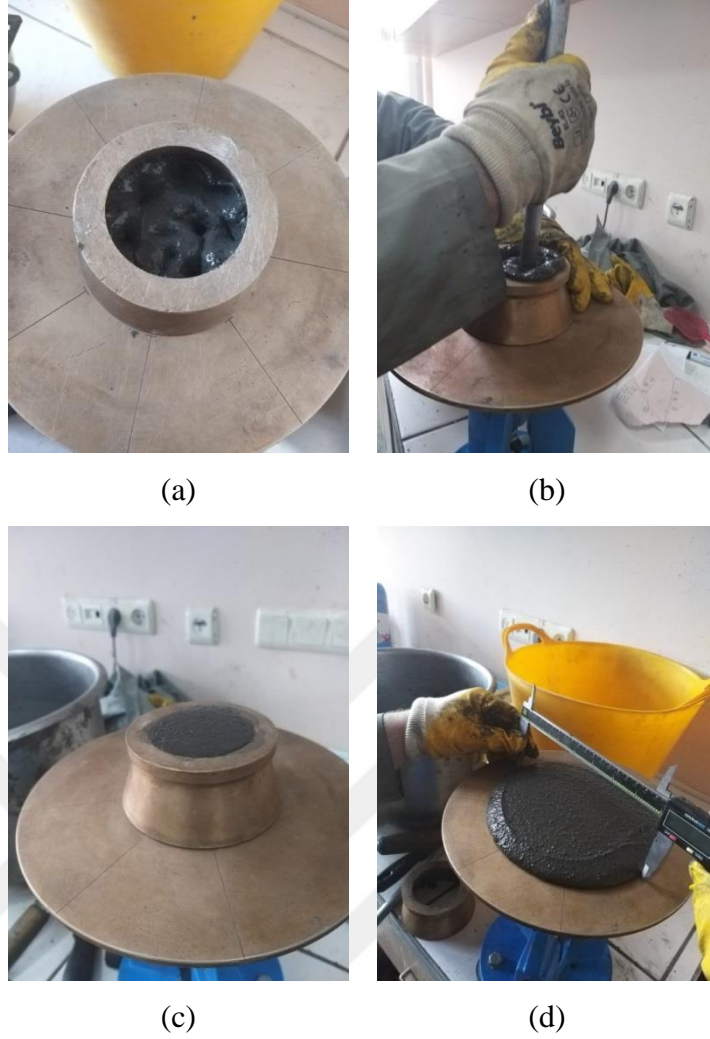


**Fotoğraf 3.3.** Geopolimer harç hamuru (a), kalıba alınan numuneler (b) ve numunelerin laboratuvar ortamında kür edilmesi (c)

### 3.6 Test Prosedürleri

#### 3.6.1 Taze özellik (Yayılma çapı)

ASTM C1437-15'e (2017) göre, yayılma tablası deneyi yapılarak taze geopolimer harçların yayılma çapı değerleri ölçülmüştür (Fotoğraf 3.4). Huninin alt çapı 100 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 60 mm'dir. Huni, yayılma tablasının ortasına yerleştirilmiş ve 2 kademeli olarak taze harçla doldurulmuştur. Taze harcın üniform bir şekilde sıkıştırılması için her kademedede 20 kez şişlenmiştir. Huninin üst yüzeyi düzleştirildikten sonra huni anında dikey olarak kaldırılmıştır. Daha sonra akış tablası 15 saniyede 25 kez düşürülmüştür. Yayılma çapı simetrik olarak ölçülen 4 çapın okunması ve bunların ortalaması alınarak bulunmuştur.



**Fotoğraf 3.4.** Yayılma Çapı deneyi; huninin yarısı dolu hali (a), 20 kere şişleme (b), tesviyelenmiş son hali (c) ve yayılma çapı ölçümü (d)

### 3.6.2 Fiziksel özellikler

Geopolimer harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için 40x40x160 mm boyutlarındaki numunler kullanılmıştır. Numunelerin hava kuru ağırlığı tartıldıktan sonra ( $W_3$ ), numuneler, 24 saat boyunca su içerisinde bekletilmiş (Fotoğraf 3.5 (a)), yüzeyleri havlu ile temizlenip (Fotoğraf 3.5 (b)) tartılmıştır ( $W_4$ ). Daha sonra numunelerin su içerisindeki ağırlığı Arşimet terazisi yardımıyla ölçülmüş ( $W_2$ , Fotoğraf 3.5 (c)) ve son olarak numuneler etüv içerisinde  $100\pm 5$  °C sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilmiş ve etüv kuru ağırlıkları ( $W_1$ ) belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık, kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve doymun kuru yüzey özgül ağırlık 28. günde, su emme ve porozite ise 1., 7. ve 28. günlerde, Denklem 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6

kullanılarak belirlenmiştir. Her test yaşı için 3'er adet numune kullanılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır.

$$\text{Birim hacim ağırlık} = \frac{W_1}{V} \quad (3.1)$$

$$\text{Kuru özgül ağırlığı} = \frac{W_1}{W_4 - W_2} \quad (3.2)$$

$$\text{Görünür özgül ağırlık} = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \quad (3.3)$$

$$\text{Doğun kuru yüzey özgül ağırlık} = \frac{W_4}{W_4 - W_2} \quad (3.4)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \frac{W_4 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (3.6)$$

$W_1$ : Numunenin etüv kuru ağırlığı (gr)

$W_2$ : Numunenin su içindeki ağırlığı (gr)

$W_3$ : Numunenin havadaki ağırlığı (gr)

$W_4$ : Numunenin kuru yüzey doymuş ağırlığı (gr)

$V$ : Kalıbın hacmi ( $\text{cm}^3$ )



(a)



(b)



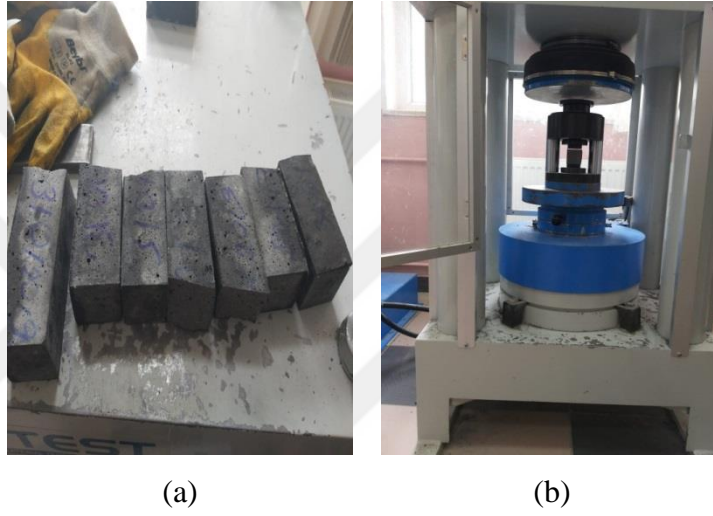
(c)

**Fotoğraf 3.5.** Numunelerin 24 saat boyunca su içerisinde bekletilmesi (a), numune yüzeylerinin havlu ile kurulanması (b) ve Arşimet terazisi (c)

### 3.6.3 Mekanik Özellikler

#### 3.6.3.1 Basınç deneyi

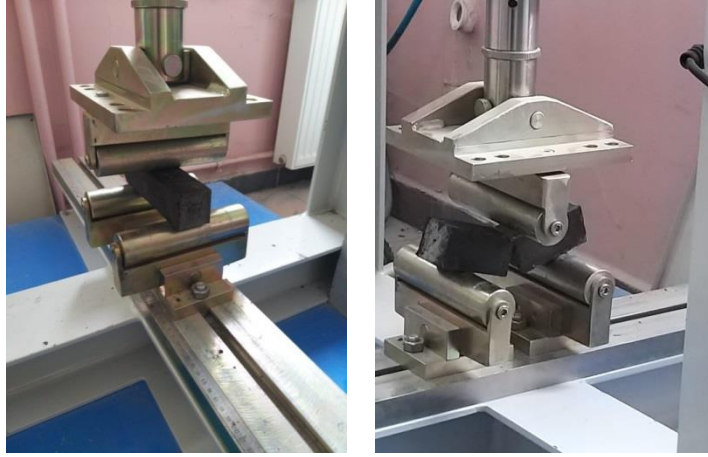
Eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler (Fotoğraf 3.6 (a)), ASTM C349-14'e (2017) göre 1. 7. ve 28. günlerde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur (Fotoğraf 3.6 (b)). Her bir test yaşı için 6 numune kullanılmıştır. Basınç deneyinde yükleme hızı 2,4 kN/s olarak uygulanmıştır. Her bir karışım için basınç dayanımı 6 numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



**Fotoğraf 3.6.** Eğilme deneyinde ikiye ayrılan numuneler (a) ve basınç deneyi (b)

#### 3.6.3.2 Eğilme deneyi

ASTM C348-14'e (2017) göre, 1., 7. ve 28. günlerde eğilme dayanımını belirlemek için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmış ve tek noktadan yükleme yapılmıştır (Fotoğraf 3.7). Her bir test yaşı için 3'er adet prizmatik numune kullanılmıştır. Yükleme hızı 0.05 kN/s'dir. Her bir karışımın eğilme dayanımı 3 numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



(a)

(b)

**Fotoğraf 3.7.** 3 noktalı eğilme deneyi (a) ve numunenin kırılması (b)

### 3.6.3.3 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi

Uygulama yöntemi çok basit ve tahribatsız deney olan ultrasonik titreşim hızı (UTH) inşaat mühendisliği alanında çok fazla kullanılan bir deneydir. Ultrasonik dalganın numunenin bir ucundan diğer ucuna ilk varış süresini ölçmek için ultrasonik titreşim hızı deneyi yapılır. Ultrasonik deneyleri ASTM C597-16 (2016) standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Bu deney, 40x40x160 mm boyutlarında 3 prizmatik harç örneğine 3 noktalı eğilme deneyi uygulanmadan önce 1., 7. ve 28. günlerde numunenin 160 mm'lik uzunluğuna uygulanmıştır (Fotoğraf 3.8). Her test yaşı için, her bir örnekten 2 olmak üzere bir karışımdan toplamda 6 okuma alınmış, bu değerlerin ortalaması UTH değeri olarak belirlenmiştir.



**Fotoğraf 3.8.** UTH deneyinin yapılışı

### 3.6.4 Durabilite deneyi (Kılcal su geçirimsizliği)

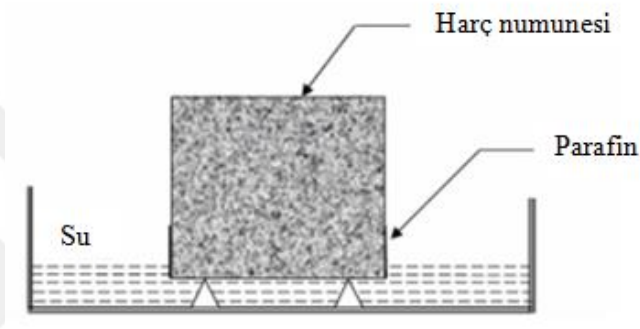
Kılcallık deneyi, harcın/betonun geçirimsizliğini değerlendirmek için yapılan en kolay kriterlerden biri olarak kabul edilir. Kılcal çatlaklar nedeniyle su, beton veya harç numunelerine nüfuz edebilir. Young-laplace denklemine göre gözeneklerin boyutuna bağlı kılcal basınç, jel ve kılcal gözeneklerdeki gözenek alanı ile orantılıdır. Kılcal su geçirimsizliği deneyi, harç veya beton numuneler tarafından kılcal yolla emilen su miktarını değerlendirir. Bu çalışmada, her bir karışım için 50x50x50 mm boyutlarındaki 3 adet numunenin, 1., 7. ve 28. günlerde kılcal su geçirimsizliği değerleri belirlenmiştir (Fotoğraf 3.9). Numuneler, deney günü geldiğinde 100±5 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca etüvde bekletildikten sonra sadece bir yüzeyi suyla temas etmesini sağlamak için yan tarafları parafin ile kaplanmıştır. İlk tartımı yapılan numunelerin bir yüzeyi suya daldırılmıştır. Su seviyesinin; numune tabanından yaklaşık 5 mm olmasına dikkat edilmiştir. Numuneler, su içerisine bırakıldıktan sonra, 1., 4., 9., 16., 25., 36., 49. ve 64. dakikalarda sudan çıkarılmış ve sulu yüzeyleri havluya silindikten sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Karışımların kılcal su geçirimsizliği değerleri 3 numuden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Fotoğraf 3.9.** Kılcal su geçirimsizliği deneyi (a), numunelerin kurulanıp tartılması (b) ve kılcal su geçirimsizliği deney düzeneği (c)

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

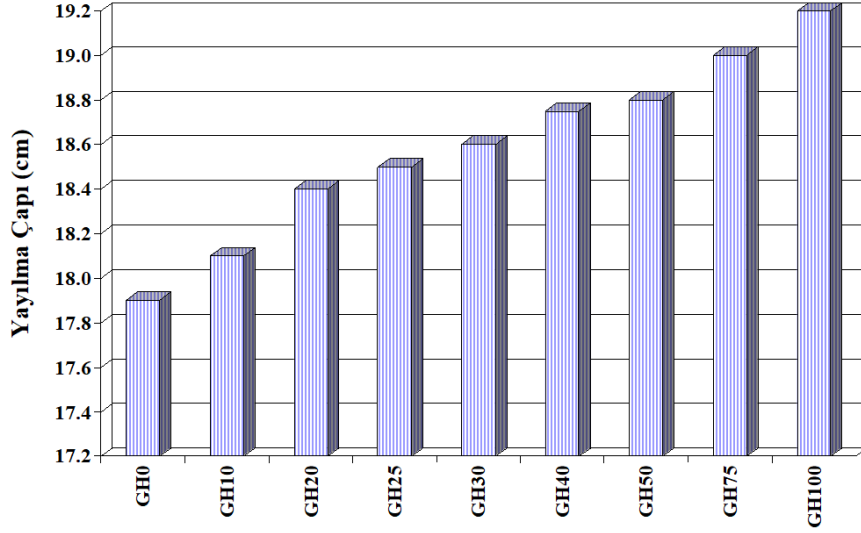
#### 4.1 Yayılma Çapı

Yayılma çapı geopolimer harcın karıştırma işleminin tamamlanmasından hemen sonra ölçülmüştür. Geopolimer harç için minimum  $150\pm 10$  mm yayılma çapı kalıplara kolayca yerleştirmek için gereken akış olarak açıklanabilmektedir (Mermerdaş vd., 2017). Harcın yayılma çapına bağlı olarak işlenebilirlik seviyesi Çizelge 4.1’de sınıflandırılmıştır (Ghosh ve Ghosh, 2012).

**Çizelge 4.1.** Geopolimer harcın işlenebilirlik kriterleri

Sınıflandırma	Akış Çapı	İşlenebilirlik
1	250 mm fazla	Çok yüksek
2	180-250 mm	Yüksek
3	150-180 mm	Orta
4	120-150 mm	Katı
5	120 mm az	Çok katı

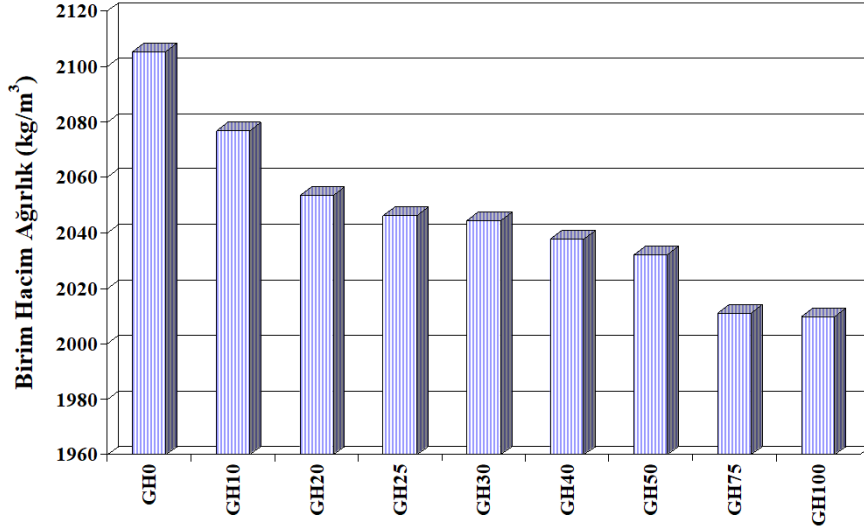
Bu tez çalışmasında GH0, GH10, GH20, GH25, GH30, GH40, GH50, GH75 ve GH100 karışımlarının yayılma çapları Şekil 4.1.’de görüldüğü gibi sırasıyla 18,0; 18,1; 18,4; 18,5; 18,6; 18,75; 18,8; 19 ve 19,2 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar; geopolimer harcın yüksek işlenebilirlik özelliğine sahip olduğunu ve uçucu kül agregası miktarı arttıkça yayılma çapı değerinin arttığını göstermiştir (Öz, 2014). Agregada özellikleri ve bağlayıcı bileşenleri geopolimer harcın işlenebilirliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Beton tasarımında pürüzsüz yüzeyli küresel agregalar kullanılması akış çapı değerini arttırmaktadır (Tattersall, 1991; Quiroga, 2003). EFNARC’da (2005) karışımda küresel agregada kullanılması sonucunda iç sürtünme azalacağından karışımın işlenebilirliğinin artacağı bildirilmiştir. Li vd. (2004) aynı hafif agregada oranlarında, hafif agreganın çapının belirli bir sınıra kadar yükseltilmesi sonucu çimentolu malzemelerin akışkanlığının artacağını belirtmişlerdir.



Şekil 4.1. Geopolimer harçların yayılma çapları

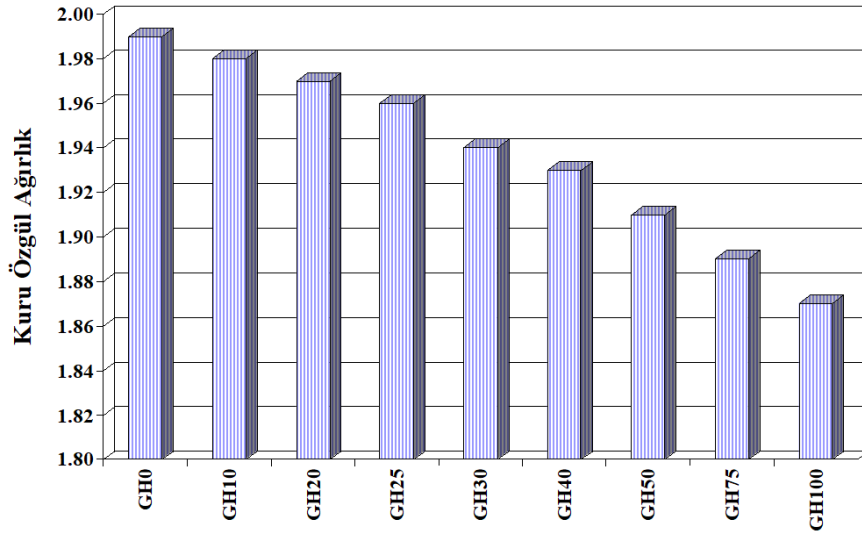
## 4.2 Fiziksel Özellikler

Geopolimer harçların 28 günlük birim hacim ağırlıklarını gösteren grafik Şekil 4.2’de verilmiştir. Geopolimer harçların birim hacim ağırlık değerleri, harç numunelerinin yoğunluklarını değerlendirmede yardımcı olan temel bir parametredir. Şekil 4.2’den görüldüğü üzere, geopolimer harçların içeriğindeki uçucu kül agregası miktarı arttıkça harçların birim hacim ağırlıkları azalmaktadır. Örneğin, en yüksek birim hacim ağırlık kontrol harcından ( $2105,47 \text{ kg/m}^3$ ), en düşük birim hacim ağırlık ( $2009,8 \text{ kg/m}^3$ ) ise GH100 harcından elde edilmiştir. Bilindiği üzere beton, harç veya geopolimer üretiminde kullanılan malzemelerin özgül ağırlığı, üretilen malzemenin birim hacim ağırlığını doğrudan etkilemektedir (Hardjito vd., 2004). Bu nedenle, uçucu kül agregasının özgül ağırlığı (1,76), kuvars agregasının özgül ağırlığından (2,65) daha düşük olduğu için uçucu kül agregası ikame oranı arttıkça malzemenin birim hacim ağırlığı azalmıştır.

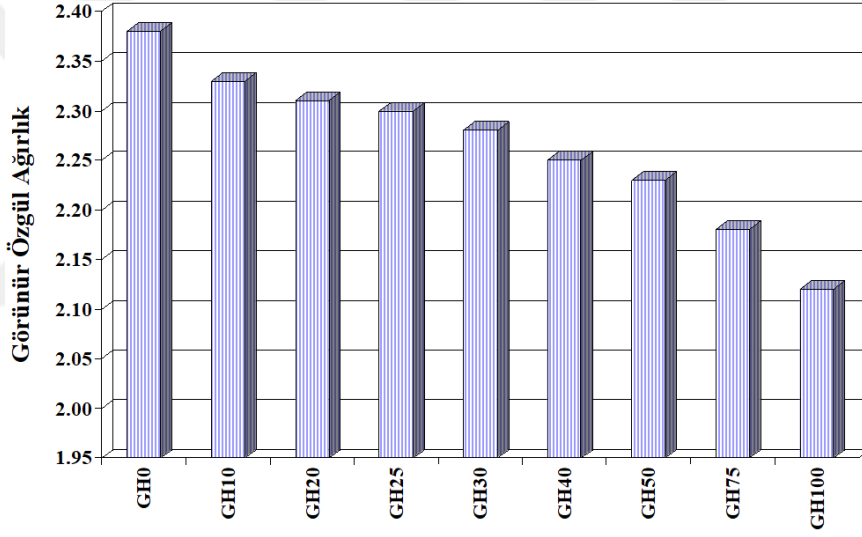


**Şekil 4.2.** Geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları

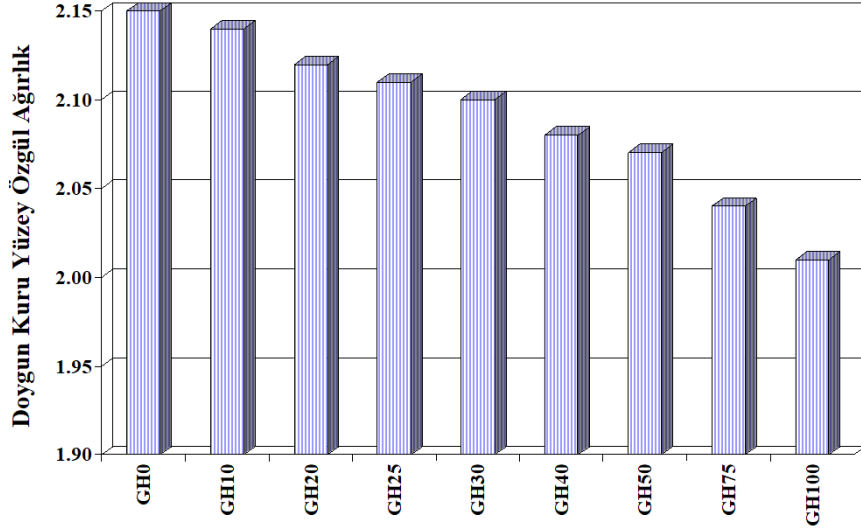
Geopolimer harçların 28 günlük kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve doymun kuru yüzey özgül ağırlık değerleri sırasıyla, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre, geopolimer harçların kuru özgül ağırlık değerleri 1,87-1,99 aralığında, görünür özgül ağırlık değerleri 2,12-2,38 aralığında ve doymun kuru yüzey özgül ağırlık değerleri ise 2,01-2,15 aralığında değişmiştir. Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'ten de açıkça görüleceği üzere geopolimer harçları için en yüksek özgül ağırlık değerleri kontrol harcından elde edilirken, en düşük özgül ağırlık değerleri ise maksimum uçucu kül agregası kullanım oranına sahip olan GH100 harcından elde edilmiştir. Bu bulgulara göre, geopolimer harçların kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve doymun kuru yüzey özgül ağırlık değerleri, kuvars agregası yerine kullanılan uçucu kül agregası kullanım oranı arttıkça giderek azalmıştır. Bu durum birim hacim ağırlık deneyinde bulunan verileri destekler niteliktedir. Ayrıca, geopolimer harçlardan elde edilen bu üç özgül ağırlık verileri kıyaslandığında, görünür özgül ağırlık > doymun kuru yüzey özgül ağırlık > kuru yüzey özgül ağırlık şartı sağlanmıştır (Baradan vd., 2012).



Şekil 4.3. Geopolimer harçların kuru özgül ağırlıkları

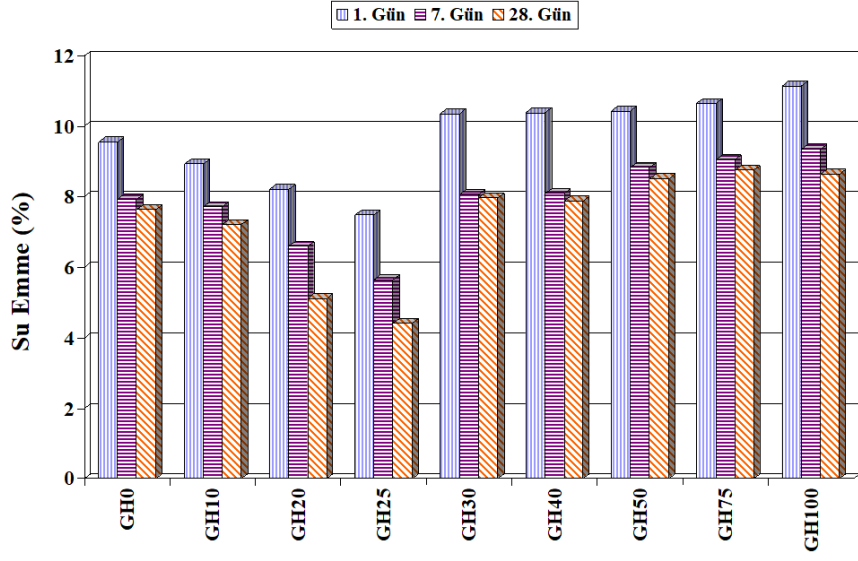


Şekil 4.4. Geopolimer harçların görünür özgül ağırlıkları

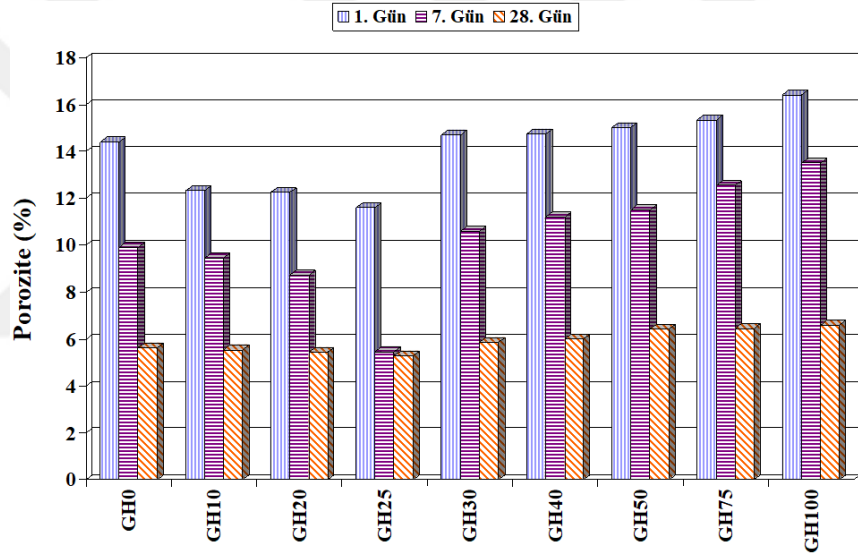


**Şekil 4.5.** Geopolimer harçların doymun kuru yüzey özgül ağırlıkları

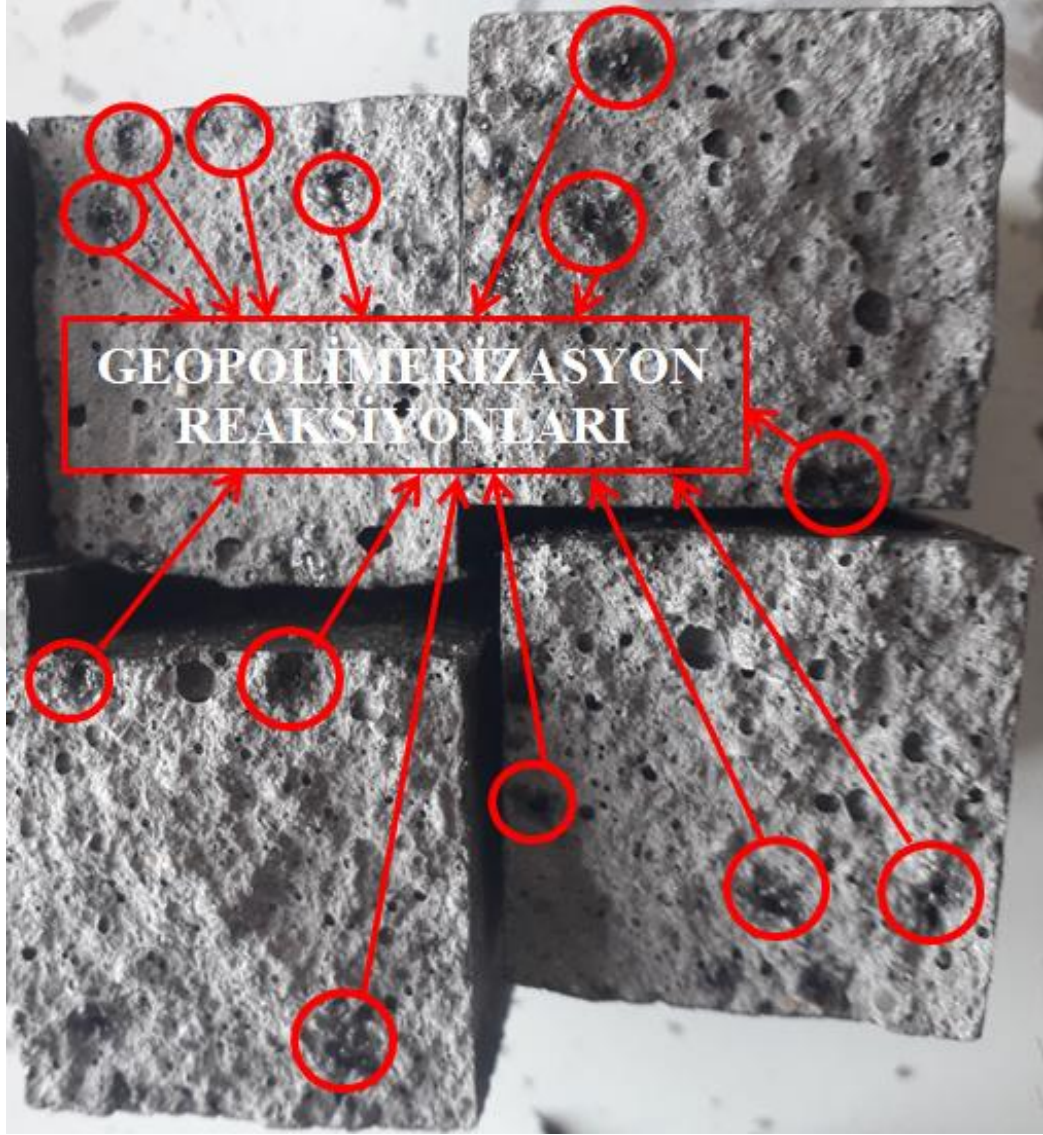
Geopolimer harçlara ait su emme ve porozite değerleri yüzde olarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Geopolimer harçların, su emme oranları 1. günde %7,48-11,15, 7. günde %5,64-9,35 ve 28. günde %4,42-8,63 aralığında ve porozite değerleri ise 1.günde %11,61-16,42, 7. günde %5,46-13,5 ve 28. günde %5,29-6,61 aralığında değişmektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verildiği gibi, geopolimer harçların su emme oranları ve porozite değerleri, %0 uçucu kül agrega ikameli harçtan, %25 uçucu kül agrega ikameli harca kadar sürekli azalırken, %30 uçucu kül agrega ikameli harçtan, %100 uçucu kül agrega ikameli harca kadar sürekli artmıştır. Su emme ve porozite değerlerinin GH10, GH20 ve GH25 harçlarında kontrol harcına göre daha az olması, uçucu kül agregası ile alkali aktivatörler arasında gerçekleştiği düşünülen geopolimerizasyon reaksiyonuna atfedilebilir. Bu reaksiyonun meydana geldiğini gösteren numunelere ait görsel Fotoğraf 4.1’de verilmiştir. Fotoğraf 4.1’den görüldüğü üzere uçucu kül agregasının olduğu bölgeler geopolimerizasyon reaksiyonundan dolayı diğer bölgelere göre daha koyu bir hal almıştır. Ayrıca, GH30 harcından itibaren meydana gelen su emme ve porozite değerlerindeki artış ise uçucu kül hafif agrega miktarının artması sonucu malzemenin içerisindeki boşluk miktarının giderek daha fazla miktarda artmasına bağlanabilir. Bununla birlikte, test yaşı arttıkça su emme ve porozite değerlerinde azalma görülmektedir (Öz, 2017).



Şekil 4.6. Geopolimer harçların su emme değerleri



Şekil 4.7. Geopolimer harçların porozite değerleri



**Fotoğraf 4.1.** Uçucu kül agregası ve alkali aktivatörler arasında gerçekleştiği düşünülen geopolimerizasyon reaksiyonları (GH25)

#### **4.3 Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Ultrasonik Titreşim Hızı**

Geopolimer harç numunelerinin 1., 7. ve 28. günlerdeki basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UTH değerleri sırasıyla, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları 1.günde 25,12-50,63 MPa aralığında, 7. günde 27,92-53,32 MPa aralığında ve 28.günde 35,04-60,79 MPa aralığında değişmektedir. 1., 7. ve 28. günlerde, en yüksek basınç dayanımı değerleri GH25 harcından elde edilmiş olup, bu değerler kontrol harcından sırasıyla, %38,8, %43,4 ve %39,6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. %30 ve daha fazla oranda uçucu kül agregası içeren karışımların basınç dayanımları, GH25 harcından daha düşük olup,

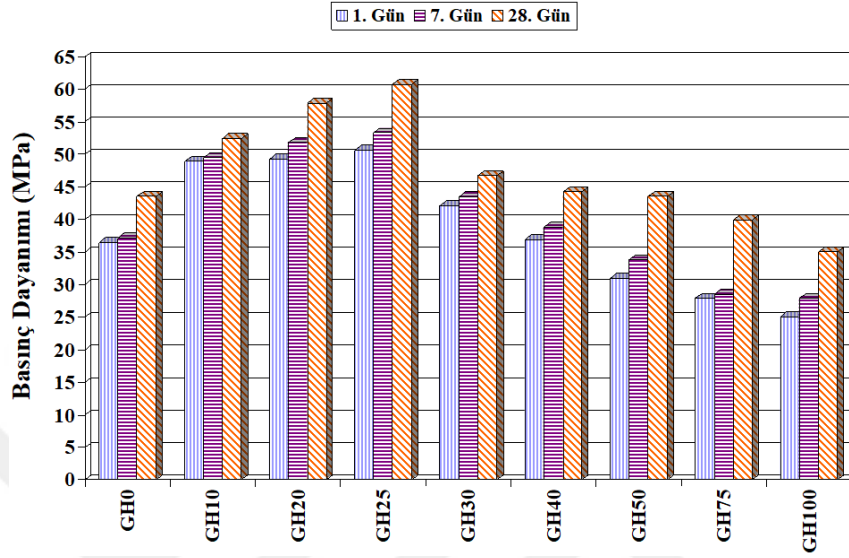
uçucu kül agregası kullanım oranı arttıkça geopolimer harçların basınç dayanımı giderek azalmıştır. Bu azalmaya rağmen GH30 ve GH40 harçlarının basınç dayanımı değerleri her 3 test yaşı için de GH0 harcından daha yüksek çıkmıştır.

Geopolimer harçların 1., 7. ve 28. günlerdeki eğilme dayanımları incelendiğinde, harçların eğilme dayanımı değerleri, 1. günde 5,5-10,33 MPa aralığında, 7. günde 6-10,5 MPa aralığında ve 28. günde 6,36-11,1 MPa aralığında değiştiği görülmektedir. Dene sonuçlarına göre, 1., 7. ve 28. gün için en yüksek eğilme dayanımı değerleri GH25 harcından elde edilirken, en düşük eğilme dayanımı değerleri GH100 harcından elde edilmiştir. GH10, GH20 ve GH25 harçlarının eğilme dayanımları 28. gün için GH0 harcından sırasıyla, %18,7, %35,1 ve %40,9 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. %25 uçucu kül agregası içeriğinden sonra 1., 7. ve 28. gün için geopolimer harçların eğilme dayanımı değerleri uçucu kül agregası kullanım oranı arttıkça giderek azalmıştır. Bununla birlikte, 1., 7. ve 28. gün için GH30 harcının eğilme dayanımı, GH25 harcının eğilme dayanımından daha düşük olmasına rağmen, GH0 harcından daha yüksek sonuçlar vermiştir.

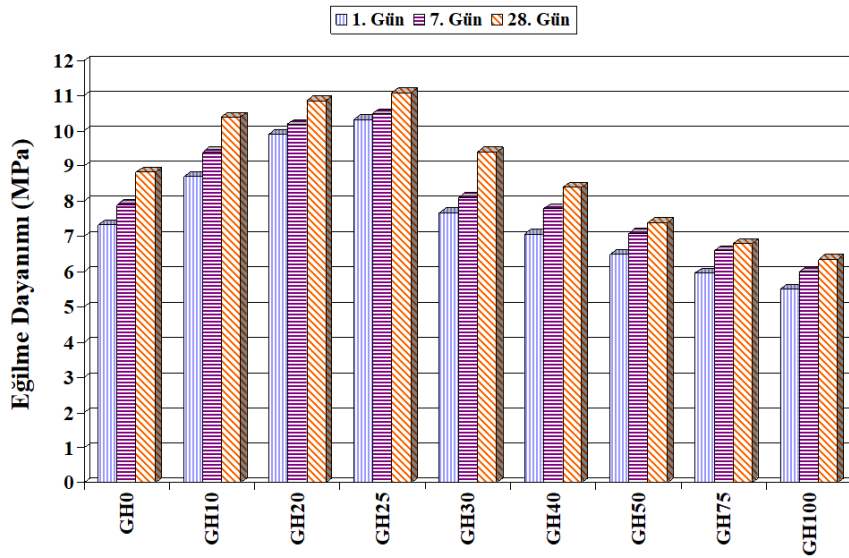
UTH deney sonuçlarına göre geopolimer harçların ultrasonik titreşim hızları basınç dayanımıyla paralel olarak değişmiştir (Güneş, 2018). Test yaşının artmasıyla artan ultrasonik titreşim hızları, 2590-3620 m/s aralığında değişmektedir. Uçucu kül agregası miktarı arttıkça, her üç test yaşı için de, %25 seviyesine kadar UTH değerleri artmış, %25 seviyesinden sonra ise bu değerde azalma görülmüştür.

Geopolimer harçların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UTH değerlerinden elde edilen sonuçlara göre, %25 uçucu kül agregası içeriğine kadar mekanik performansın artması, Fotoğraf 4.1'de verilen görüntüyle açıklanabilir. Bu resimden görülebileceği üzere eğilme sonucu kırılmış harç numunelerinde kırmızı yuvarlaklara alınmış bölgeler harç numunelerinin diğer bölgelerinden daha koyu bir görünüme sahiptir. Bu durum, uçucu kül agregasıyla alkali aktivatörler arasındaki geopolimerizasyon reaksiyonuna atfedilebilir. Bu kimyasal reaksiyona bağlı olarak, uçucu kül agregasının yerine kullanıldığı kuvars agregasına göre bağlayıcı malzemeler ile agrega arasında daha iyi bir ara yüzey geçiş bölgesi sağladığı söylenebilir (Gümüş, 2016). GH25 harcından daha fazla uçucu kül içeriğine sahip olan harçlarda basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UTH değerinin azalması ise artan hafif agrega yüzdesinin geopolimerizasyon

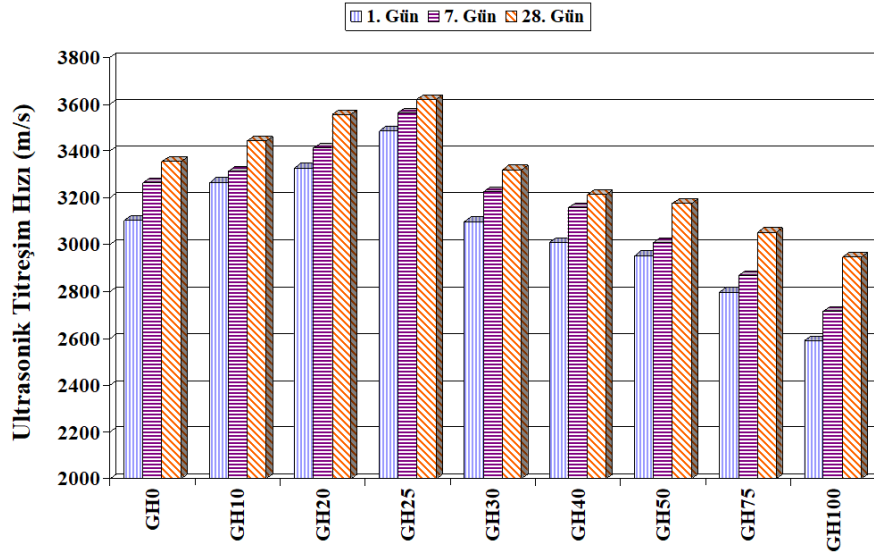
reaksiyonunu olumsuz etkilemesinin yanı sıra, dayanımlardaki bu azalmanın, hafif agreganın matris içerisindeki zayıf davranışından ve fiziksel özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir (Öz, 2014).



Şekil 4.8. Geopolimer harçların basınç dayanımları



Şekil 4.9. Geopolimer harçların eğilme dayanımları



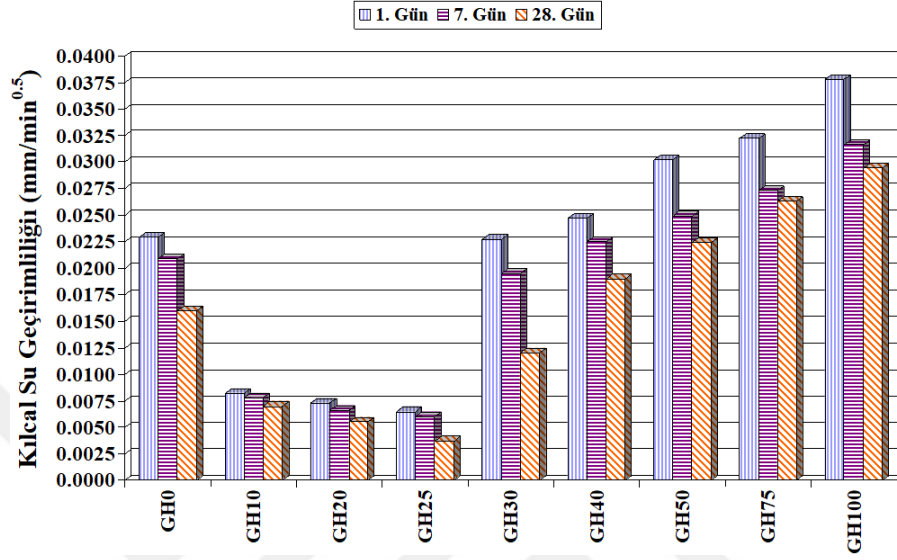
Şekil 4.10. Geopolimer harçların ultrasonik titreşim hızı değerleri

#### 4.4 Kılcal Su Geçirirliği

Beton veya harç numunelerinin su geçirirliğini tayin etmek için uygulanan durabilite deneylerinden birisi de kılcal su geçirirliğidir. Malzemenin su geçirirliğini; çapı, tipi ve içerisindeki boşluk yapısı, çimento esaslı mineral katkıları veya kimyasal katkıların varlığı, üretilen beton ya da harcın karışım oranları, beton veya harcın bünyesindeki hava boşluklarının hacmi ile bünyesindeki gözenek yapısı belli etmektedir (Gesoğlu vd., 2012b).

Geopolimer harç karışımlarının 1, 7. ve 28. günlerdeki kılcal su geçirirliği değerleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.11’de verilen değerlere göre, geopolimer harçların 1 günlük kılcal su geçirirliği değerleri 0,0065-0,0378 mm/min<sup>0,5</sup> aralığında, 7 günlük kılcal su geçirirliği değerleri 0,006-0,0316 mm/min<sup>0,5</sup> aralığında ve 28 günlük kılcal su geçirirliği değerleri ise 0,0037-0,0294 mm/min<sup>0,5</sup> aralığında değişmektedir. Şekil 4.11’den görülebileceği üzere, geopolimer harçların kılcal su geçirirliği değerleri GH25 harcına kadar azalmış, GH30 harcından başlayarak giderek artmıştır. Bu sonuçlara göre, durabilite performansı açısından her üç test yaşı için de en iyi kılcal su geçirirliği değerleri GH25 harcından elde edilmiştir. Geopolimer harçların durabilite performanslarında, GH25 harcına kadar meydana gelen gelişim, Fotoğraf 4.1’de sunulan görsel yardımıyla, uçucu kül agregası ve alkali aktivatörler arasındaki geopolimerizasyon reaksiyonuyla açıklanabilir. Bu reaksiyon sonucu gelişen ara yüzey

geçiş bölgesi geopolimer harçların su geçirimsizliğini %25 uçucu kül agregası içeriğine kadar azaltmıştır. Daha fazla uçucu kül agregası içeriği için kılcal su geçirimsizliği değerlerindeki artış ise hafif agregata kullanımı sonucu artan ortalama gözenek çapı ve toplam gözeneklilik ile açıklanabilir (Liu vd., 2011; Güneyisi vd., 2013).



Şekil 4.11. Geopolimer harçların kılcal su geçirimsizliği değerleri

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında; sabit miktarlarda uçucu kül, alkali aktivatörler (NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ile 0-0,4 mm, 0,6-1,2 mm ve 1,2-2,5 mm kuvars agregaları kullanılarak geopolimer kontrol harç karışımı üretilmiştir. Daha sonra 1,2-2,5 mm kuvars agregası yerine soğuk bağlama yöntemiyle üretilen 1,2-2,5 mm uçucu kül agregası belirli oranlarda kullanılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yayılma çapı deney sonuçlarına göre, tasarlanan geopolimer harçların yüksek işlenebilirlik özelliğine sahip olduğu ve harç içerisinde kullanılan uçucu kül agregası miktarı arttıkça, geopolimer harçların yayılma çapı değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül agregasının işlenebilirliğe olan bu pozitif etkisi, pürüzsüz yüzeyli küresel yapısıyla açıklanabilir.
- Geopolimer harçların içeriğindeki uçucu kül agregası miktarı arttıkça harçların birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Buna paralel olarak, geopolimer harçların kuru özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık ve doymun kuru yüzey özgül ağırlık değerleri de uçucu kül agregası kullanım oranı arttıkça azalmıştır. Uçucu kül agregasının özgül ağırlığının kuvars agregasının özgül ağırlığından daha düşük olması birim hacim ağırlık ve özgül ağırlık değerlerindeki azalmanın temel nedenidir.
- Geopolimer harçların su emme ve porozite değerleri GH0 harcından, GH25 harcına kadar sürekli azalırken, GH30 harcından, GH100 harcına kadar sürekli artmıştır. Benzer şekilde, geopolimer harçların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, UTH ve kılcal su geçirimsizliği özellikleri, %25 uçucu kül agregası içeren geopolimer harca kadar gelişirken, %25'den fazla uçucu kül agregası içeriklerinde olumsuz yönde etkilenmiştir. Bu nedenle, fiziksel, mekanik ve durabilite açısından en iyi sonuçlar GH25 harcından elde edilirken, en olumsuz sonuçlar GH100 harcından elde edilmiştir. GH25 harcına kadar meydana gelen bu gelişim, uçucu kül agregasıyla alkali aktivatörler arasındaki geopolimerizasyon reaksiyonuyla açıklanabilir. Eğilme deneyi sonucu kırılan harç yüzeyi incelendiğinde geopolimerizasyon reaksiyonunun olduğu tahmin edilen bölgeler, harcın diğer bölgelerine göre daha koyu bir hal almıştır. Bu kimyasal reaksiyona bağlı olarak, uçucu kül agregasının yerine kullanıldığı

kuvars agregasına göre bağlayıcı malzemeler ile agrega arasında daha iyi bir ara yüzey geçiş bölgesi sağladığı söylenebilir.

- Tüm bu deney sonuçlarına göre, 1,2-2,5 kuvars agregası yerine, optimum uçucu kül agregası içeriğinin %25 olduğu ve GH25 harcının işlenebilirlik, fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri açısından, geopolimer sektöründe kullanılabilceği ve yüksek bir performans sergileyebileceği söylenebilir. Ayrıca, tasarlanan diğer geopolimer harçların karakteristik özelliklerine bağlı olarak yapı sektöründe kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.
- Bu çalışma, atık malzeme olan uçucu külün geopolimer harç üretiminde hem agrega hem de bağlayıcı malzeme olarak kullanılması sürdürülebilir çevre etkisi açısından da inşaat sektörüne katkı sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

Antoni, D. W. and Hardjito, D., ‘‘Improving the durability of pozzolan concrete using alkaline solution and geopolymer coating’’, *Procedia Engineering* 125, 747-753, 2015.

Arıöz, Ö., ‘‘Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi’’, *107M344 No’lu Tübitak Projesi*, İnş. Müh. A.B.D., Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2009.

Aruntaş, H.Y. ‘‘Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyelleri’’. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21, 193-203, 2006.

ASTM C127, American society for testing and materials. standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate, *Annual book of ASTM standards*, WestConshohocken, 2007

ASTM C330, Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2009.

ASTM C348-14, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

ASTM C349-14, Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

ASTM C597-16, Standard test method for pulse velocity through concrete, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2016.

ASTM C618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2015.

ASTM C1437-15, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

Bagampadde, U., Isacsson, U. and Kiggundu, B., M., “Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures”, *Material Structure* 39, 303–315, 2006.

Bakharev, T., “Geopolymeric materials prepared using class f fly ash elevated temperature curing”, *Cement and Concrete Research* 35, 1224–32, 2005.

Bakharev, T., Sanjayan, J., G. and Cheng, Y.B., “Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali–aggregate reaction”, *Cement and Concrete Research* 31, 331–334, 2001.

Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.B., “Alkali activation of Australian slag cements”, *Cement and Concrete Research* 29, 113–120, 1999.

Baradan, B., Yazıcı, H. and Aydın, S., “Beton”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Yayınları*, İzmir, 2012.

Baykal, G. and Döven, A. G. “Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results” *Conservation and Recycling* 30(1), 59-77, 2000.

Brew, D. R. M. and MacKenzie, K. J. D. “Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate”, *Journal of Materials Science* 42(11), 3990-3993, 2007.

Brough, A.R. and Atkinson, A. “Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars” Part I. Strength, hydration and microstructure”, *Cement and Concrete Research* 32, 865–79, 2002.

Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A. and Chindaprasirt, P., “Synthesis of high calcium fly ash and calcined kaolin geopolymer mortar”, *In Proceedings of the 1st International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer*, Khon Kaen, Thailand 327-335, 2006,

Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivananon, V., “Work ability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer” *Cement and Concrete Composites* 29, 224–9, 2007.

Chung, D.D.L., “Improving cement-based materials by using silica fume”, *Journal of Materials Science* 37(4), 673-682, 2002.

Daniel, K., Sanjayan, J., and Crentsil, K.S., “The Behaviour of Geopolymer Paste and Concrete at Elevated Temperatures”, *International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer*, Khon Kaen, Thailand, 105–118, 2006.

Davidovits, J., “Properties of geopolymer cements”, Kiev, *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1, 131–149. 1994.

Davidovits, J., “ Long-term durability, archaeological analogues, geological analogues”, *Geopolymer Chemistry and Applications, 4th ed. Geopolymer Institute*, Saint-Quentin, France, Chapter 17, 2015.

De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Da Silva, F.J., Pavao, B. and Veit, H., “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, 2011.

Duxon, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C, Palomo, A. and Van Deventer J.S.J, “Geopolymer technology: the current state of the art”, *Journal Material Scientist* 42 (9), 2917- 2933. 2007.

EFNARC, “European Federation of National Associations Representing for Concrete”, Specification and guidelines for self-compacting concrete, 2005.

Erdoğan, S.T., “Jeopolimerler çevre dostumudur?” *Çimento ve Beton Dünyası* 107, 50-55, 2014.

Fernandez - Jimenez, A., Palomo, J. G. and Puertas, F., “Alkali-activated slag mortars, mechanical strength behavior”, *Cement and Concrete Research* 29, 1313-1321, 1999.

Fernandez - Jimenez, A. and Palomo, A., “Characterisation of fly ashes potential reactivity as alkaline cements”, *ACI Materials Journal* 82, 2259–65, 2003.

Fernandez - Jimenez, A. and Palomo, J., “Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator”, *Cement and Concrete Research* 35, 1984–92, 2005.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E. and Öz, H. Ö. “Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag”, *Materials and Structures* 45, 1535-1546, 2012a.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Mahmood, S. F., Öz, H. Ö. and Mermerdaş, K., “Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete”, *Journal of Hazardous Material* 235-236, 352-358. 2012b.

Ghosh, K. and Ghosh, P., “Effect Of Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and W/B ratio on setting time and workability of flyash based geopolymer”, *Introduction Journal Enineering Resourche Application* (IJERA) ISSN 2, 2142–2147, 2012.

González-Corrochano, B., Alonso-Azcárate, J. and Rodas, M., “Characterization of lightweight aggregates manufactured from washing aggregate sludge and fly ash”. *Resources, Conservation and Recycling* 53(10), 571-581, 2009.

Görhan, G. and Kürklü, G. “The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures”, *Composites Part B: Engineering* 58, 371-377, 2014.

Görhan, G. ve Kürklü, G. “Farklı sınıf çimento harcı üretiminde metakaolin katkısı kullanımının araştırılması”, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 7(3), 7-14, 2015.

Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ., “Uçucu kül bölümü: kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 5-2, 33-42, 2008.

Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H., “Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları”, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 2005.

Gümüş, A., Effect of thermal curing process on geopolymer concrete properties, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon 2016.

Güneş, M., Vollastonit katkılı yüksek performanslı harçların mekanik ve durabilite özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde 2018.

Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö. and Mermerdaş, K., “Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates” *Composites Part B: Engineering* 53, 258-266, 2013.

Hamalı, Y., Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V. “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”, *ACI Materials Journal* 6, 467-472, 2004.

Hiraskar, K. G. and Patil, C., “Use of blast furnace slag aggregate in concrete”. *International Journal Of Scientific Engineering Research* 4(5), 95-98, 2013.

Hosseini, S., Soltani, S. M., Fennell, P. S., Choong, T. S. and Aroua, M. K., “Production and applications of electric-arc-furnace slag as solid waste in environmental technologies”, *Environmental Technology Reviews* 5(1), 1-11, 2016.

Hu, M., Zhu, X. and Long, F., “Alkali-activated fly ash based geopolymers with zeolite or bentonite as additives”, *Cement and Concrete Composites* 31, 762-768, 2009.

Jahromi, S.G., “Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials* 23, 2324–2331, 2009.

Kayali, O., “Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete”, *Construction and Building Materials* 22, 2393-2399, 2008.

Keyte, L.M., Lukey, G.C. and Van Deventer J.S.J., “The effect of coal ash composition on properties of waste based geopolymers”, *Advances in geopolymer science and technology Springer Science LLC* 2006.

Khale, D. and Chaudhary, R., “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review”, *Journal of materials science* 42(3), 729-746, 2007.

Kim, K.Y., Park, K.H., Park, H.C., Goo, N.S. and Yoon, K.J., “Performance evaluation of lightweight piezo-composite actuators”, *Sensors and Actuators* 120 (1), 123-129, 2005.

Koçkal, N.U. and Özturan, T., “Sinterleme Sıcaklığının Uçucu Kül Hafif Agregaların Özelliklerine Etkisi” *Ulusal beton kongresi Maya basın yayın*, 133-143, 2010.

Kong, D.L.Y. and Sanjayan, J.G., “Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete”, *Cement and Concrete Research* 40, 334–339, 2010.

Komnitsas, K. A., “Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities”, *Procedia Engineering* 21, 1023-1032, 2011.

Komnitsas K. and Zaharaki D. “Geopolymerisation: a review and prospects for mineral industry”, *Elsevier Science Direct Minerals Engineering* 20, 1261-1277, 2007.

Liu, X., Chia, K. S. and Zhang, M. H. “Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete”, *Construction and Building Materials* 25(1), 335-343, 2011.

Li, Z., Ding, Z. and Zhang, Y. “Development of sustainable cementitious materials”, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 55-76, 2004.

Mane, S. and Jadhav, H.S., “Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature”, *Magnesium*, 2,384–390, 2012.

Malhotra, N. K. “Integrating technology in marketing education”: Perspective for the new millennium”, *Marketing Education Review* 12(3), 1-5. 2002.

Malhotra, V.M. and Mehta, P.K., “High-performance, high-volume fly ash concrete for building sustainable and durable structures”, *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development* Ottawa, Canada, 2008.

Mehta, P. K. and Burrows, R. W., “Building durable structures in the 21<sup>st</sup> century”, *Indian Concrete Journal* 75(7), 437-443, 2001.

Mehta, P.K. and Monteiro, P.J., “Microstructure, properties and materials”, Fourth edition, *McGraw-Hill Education* New York. 2006.

Mermerdas, K., Algin, Z., Oleiwi, S.M. and Nassani, D.E., “Optimization of lightweight GGBFS and FA geopolymer mortars by response surface method”, *Construction Building Mateial* 139, 159-171, 2017.

Mermerdaş, K., Manguri, S., Nassani, D. E. and Oleiwi, S. M. “Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer

mortar’’, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20(6), 1642-1652, 2017.

Naik, T.R., ‘‘Sustainability of cement and concrete industries, proceedings of the international conference global construction’’, *Ultimate concrete opportunities*, Dundee, Scotland, 141-150, July, 2005.

Neupane K., Bajewa D., Shrestha, R., Chalmers, D. and Sleep P., ‘‘Mechanical properties of geopolymer concrete’’: applicability of relationship defined by AS 3600, *Concrete Australian* 40, 50–56. 2014.

Nuaklong, P., Sata, V. and Chindaprasirt, P., ‘‘Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties’’, *Journal of Cleaner Production* 112, 2300–2307, 2016.

Öz, H. Ö., Gesoglu, M., Güneyisi, E. and Sor, N. H. ‘‘Self-Consolidating Concretes Made with Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregates’’ *ACI Materials Journal*, 114(3), 2017.

Öz, H. Ö. ve Güneş, M., ‘‘Sentetik vollastonit içeren yüksek performanslı harçların dayanım özellikleri’’, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(2), 703-715. 2018.

Pacheco, C., Lahiri, S.K., Ernst, M.D. and Ball, T., ‘‘Feedback-directed random test generation’’ *In Proceedings of the 29th international conference on Software Engineering* 75-84, IEEE Computer Society, 2007.

Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T., ‘‘Alkali-activated fly ashes, a cement for the future’’, *Cement and Concrete Research* 29-8, 1323-1329, 1999.

Pedro, D., De Brito, J. and Evangelista, L., ‘‘Evaluation of high-performance concrete with recycled Aggregates : Use of densified silica fume as cement replacement’’, *Construction and Building Materials* 147, 803-814, 2017.

Provis, J. L. “Activating solution chemistry for geopolymers”. In *Geopolymers* 50-71, **Woodhead Publishing** 2009.

Quiroga, P.N., “The effect of aggregate characteristics on the performance of portland cement concrete”, *PhD Dissertation* University of Texas at Austin, 2003.

Rangan, B.V., “Low-calcium, fly-ash-based geopolymer concrete”, *Concrete construction engineering handbook*, **CRC Press** 26-1., 2008.

Rangan, B.V, Hardjito, D., Wallah S.E. and Sumajouw M.J., “Studies on fly ash-based geopolymer concrete”. *Proceedings of world congress geopolymer* France, 2005.

Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P., “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer”, *Minerals Engineering* 22, 1073-1078, 2009.

Rajamma, J.A., Labrincha, V.M. and Ferreira, M., “Alkali activation of biomass fly ash– metakaolin blends”, 98, 265–271, 2012.

Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., “Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates”, *Cement and Concrete Research* 42(9), 1242-1251, 2012.

Schmucker, M. and Mackenzie, K.J.D., “Micro structure of sodium polysialate siloxo geopolymer”, *Ceramics International* 31, 433–437, 2004.

Siddique, R. and Klaus, J., “Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review”, *Applied Clay Science* 43, 392-400, 2009.

Silva, P.D. and Crentsil, K.S., “Medium - term phase stability of  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  geopolymer systems”. *Cement and Concrete Research* 38, 870-876. 2008.

Sindhunata, J., Deventer, V., Llukey, G. and Xu, H., “Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization”, *Industrial Engineering* 45, 3559-3568, 2006.

Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindapasirt, P., “NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature”, 90, 2118-2124, 2011.

Sreenivasulu, C., Guru, J. J., Sekhar, R. M. V. and Pavan, K. D. “Effect of fine aggregate blending on short-term mechanical properties of geopolymer concrete”, 2016.

Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A., “Utilisation of fly ash in a geopolymeric material”, *Applied Geochemistry* 17-8, 1143-48, 2002.

Şengül, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F. and Tasdemir, M. A., “Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete” *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676. 2011.

Tattersall, G. H. “Workability and quality control of concrete”, *CRC Press*, 1991.

Tenn, N., Allou, F., Petit, C., Absi, J. and Rossignol, S., “Formulation of new materials based on geopolymer binders and different road aggregates”, *Ceramics International* 41, 5812–5820, 2015.

Torgal, P.,F., Gomes ,C., J. and Jalali, S., “Alkali-activated binders”: Part 2. About materials and binders manufacture”, *Construction and Building Materials* 22, 1315-1322, 2008.

TS EN 197-1, Çimento, Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.

Videla, C. and Martinez, P., “Physical, mechanical and microscopic characterization of cold bonded fly ash lightweight aggregates”, *Materiales de Construcción* 52(268), 5-18, 2002.

Vu, D.D. “Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete”, *Delft University Press*, Netherlands, 2002.

Yazıcı, H., Anuk, D. ve Arel H.Ş., “Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi* 25-2, 13-24, 2010.

Yazıcı, H., Termik santral atığı yapay alçı - Uçucu kül - Taban külü esaslı yapı malzemesi geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2004.

Zaharaki, D., Komnitsas, K. and Perdikatsis, V., “Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition”, *Journal of Materials Science* 45(10), 2715-2724, 2010.

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

Zhang, H.Y., D. Kodur, B., Wu, L. and Cao, F., “Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures”, *Construction Building Material* 109 , 17–24, 2016.

Zhang, J., Provis, J.L., Feng D. and Deventer, V., “Geopolymers for immobilization of Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup>”, *Journal of Hazardous Materials* 157, ,587-598, 2008.

Zhang, Z., “Carbon emissions trading in China the evolution from pilots to a nationwide scheme”, *Climate Policy* 15, 104-126, 2015.

Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., “Geopolymerisation of multiple minerals”, *Minerals Engineering* 15-12, 1131-39, 2002.

Xu, H. and Deventer V., “The geopolymerisation of aluminosilicate minerals”, *International Journal of Mineral Processing* 59-3, 247-66, 2000.

Xu, H. and Deventer, V., “Geopolymerisation of multiple minerals”, *Minerals Engineering* 15-12, 1131-1139, 2002.

Url-1, [www.epdk.gov.tr/ yayin\\_rapor/yillik/2007/2007.pdf](http://www.epdk.gov.tr/yayin_rapor/yillik/2007/2007.pdf), 08.05.2016

Url-2, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18782>, 10.05.2016



## ÖZ GEÇMİŞ

Turan Şevki KÖKER 21.02.1992 tarihinde Kayseri’de doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Kayseri’de tamamladı. 2010 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2015’de mezun oldu. 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi’nde yüksek lisans öğrenimine başladı.



