



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**VERMİKÜLİT VE UÇUCU KÜL KATKILI GEOPOLİMER HARÇ  
ÜRETİLMESİ**

**HAZIRLAYAN**

**HAYRETTİN TOKAY**

**DANIŞMAN**

**PROF. DR. OSMAN GENÇEL**

**BARTIN-2019**



**T.C.**  
**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**VERMİKÜLİT VE UÇUCU KÜL KATKILI GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**  
**Hayrettin TOKAY**

**JÜRİ ÜYELERİ**

Danışman	: Prof. Dr. Osman GENÇEL	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Doç. Dr. Mücahit SÜTÇÜ	- İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi M. Yasin DURGUN	- Bartın Üniversitesi

**BARTIN-2019**

## KABUL VE ONAY

Hayrettin TOKAY tarafından hazırlanan “VERMİKÜLİT VE UÇUCU KÜL KATKILI GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİLMESİ” başlıklı bu çalışma, 20.06.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Osman GENÇEL (Danışman) .....

Üye : Doç. Dr. Mücahit SÜTÇÜ .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Yasin DURGUN .....

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. H. Selma ÇELİKAY  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Osman GENÇEL danışmanlığında hazırlamış olduğum “VERMİKÜLİT VE UÇUCU KÜL KATKILI GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİLMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

20.06.2019

Hayrettin TOKAY



## ÖNSÖZ

Tez çalışması sürecinde tez danışmanlığımı kabul eden, tez konusunun belirlenmesinde öncü olan, çalışmanın yürütülmesi esnasında da yol gösteren beni yalnız bırakmayarak katkı ve emeklerini esirgemeyen, her aşamada beni aydınlatan değerli danışman hocam Prof. Dr. Osman GENÇEL'e ve kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi M. Yasin DURGUN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sürecinde malzeme temininde ince davranışlarından ve katkılarından dolayı:

- Bartın Üniversitesi'ne,
- Bartın Yazlar A.Ş.'ye,
- Pelenkoğlu Hazır Beton Yapı Elemanları İnş. Taah. San. Ltd. Şti.'ye,
- Özkimsan Kimya taşımacılık Maden İnşaat Makine Orman Ürünleri Dış Tic. ve San. Ltd Şti'ye,
- Bartın Çimento San. ve Tic. A. Ş.'ye,
- Ustaoglu İnşaat San. Taah. ve Tic. Ltd. Şti'ye teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışması sürecinde desteklerini esirgemeyen kıymetli eşim Ece TOKAY ile ablam Sümeysa SEVİNÇ'e, öğrenim hayatı boyunca da bana hem annelik hem de babalık yapan, dualarını esirgemeyen, her türlü desteğini sunan çok kıymetli annem Cazyra ARAS'a en samimi dileklerle teşekkürü borç bilirim.

Hayrettin TOKAY

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **VERMİKÜLİT VE UÇUCU KÜL KATKILI GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİLMESİ**

**Hayrettin TOKAY**

**Bartın Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Osman GENÇEL**

**Bartın-2019, sayfa: 59**

Bu çalışmada, vermikülit, silis kumu ve uçucu kül (UK) kullanılarak geopolimer harç üretilmiştir. UK'yı aktifleştirmek için  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH kullanılmıştır. Üretilen bu harç numuneleri ile yayılma tablası, su emme, taze ve kuru birim hacim ağırlık, görünen porozite, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, ısı iletkenlik ve mikroyapı analizi (SEM) deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerle, numunelerin fiziksel özellikleri analiz edilmiştir. Geopolimer harç numuneleri 28 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numunenin ebatları  $4 \times 4 \times 16$  cm'dir. Üretilen numuneler 12 farklı seriye sahiptir. Toplam 36 adet numune üretilmiştir. Bu çalışmada amaç, vermikülit kullanarak hafif, ısı ve ses yalıtımlı geopolimer harç üretmek ve atık malzeme olan UK'nın en fazla oranda kullanmaktır. Sonuç olarak, geopolimer harçların görünen porozite değerleri %30,19- %39,5 arasında değişkenlik göstermiştir. Ayrıca kuru birim hacim ağırlık değerleri  $1,19 \text{ g/cm}^3$ - $1,55 \text{ g/cm}^3$ ; ultrases geçiş hızı değerleri  $1,84 \text{ km/s}$ - $3,0 \text{ km/s}$  ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri  $0,373$ - $0,794 \text{ W/mK}$  arasında değişmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Vermikülit; uçucu kül; geopolimer harç.

**Bilim Kodu:** 624.05.01

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **PRODUCTION OF GEOPOLYMER MORTAR WHICH INCLUDING VERMICULITE AND FLY ASH**

**Hayrettin TOKAY**

**Bartın University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Prof. Osman GENÇEL**

**Bartın-2019, pp: 59**

In this study, geopolymer mortar was produced by using vermiculite, silica sand and fly ash (FA). To activate FA  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and NaOH are used. With produced mortar samples, flow table, water absorptions, wet and dry unit weight, apparent porosity, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, thermal conductivity and microstructure analysis (SEM) experiments were carried out. With this experiments, physical characteristics of the samples were analysed. Geopolymer mortar samples were kept waiting in laboratory environment for 28 days. Dimensions of samples are  $4 \times 4 \times 16$  cm. Produced samples have 12 different series. 36 samples were produced in total. The purpose in this study is to produce light, sound and thermal insulated geopolymer mortar by using vermiculite and is to use FA which is waste material in maximum ratio. Consequently, apparent porosity values of the geopolymer mortars ranged between %30,19 and %39,5. Also dry unit weight values ranged  $1,19 \text{ g/cm}^3$ - $1,55 \text{ g/cm}^3$ ; ultrasonic pulse velocity values ranged 1,84-3,0 km/s and coefficient of thermal conductivity values ranged between 0,373-0,794 W/mK.

**Keywords:** Vermiculite; fly ash; geopolymer mortar.

**Science Code:** 624.05.01

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 Beton.....	1
1.2 Uçucu Kül.....	2
1.2.1 Uçucu Külün Tanımı.....	2
1.2.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması.....	2
1.2.3 Uçucu Külün Kullanım Alanları ve Özellikleri.....	3
1.3 Geopolimerler.....	5
1.3.1 Geopolimerlerin Tarihçesi.....	5
1.3.2 Geopolimerin Tanımı ve Oluşumu.....	6
1.3.3 Geopolimerin Kullanım Alanları.....	9
1.4 Vermikülit.....	10
1.4.1 Vermikülitin Tanımı.....	10
1.4.2 Vermikülitin Üretimi.....	10
1.4.3 Vermikülitin Kullanım Alanları.....	10
1.5 Alkali Aktivatörler.....	11
1.6 Silis Kumu.....	12



BÖLÜM 2 LİTERATÜR ÖZETİ .....	13
BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOT .....	19
3.1 Kullanılan Malzemeler.....	19
3.1.1 Uçucu Kül .....	19
3.1.2 Silis Kumu.....	20
3.1.3 Su.....	20
3.1.4 Sodyum Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	20
3.1.5 Sodyum Hidroksit (NaOH) .....	21
3.1.6 Vermikülit .....	21
3.2 Deneysel Çalışmalar .....	23
3.2.1 Geopolimer Harç Karışımlarının Oranlarının Belirlenmesi.....	23
3.2.2 Geopolimer Harç Karışımlarının Hazırlanması .....	23
3.3 Uygulanan Deneyler .....	25
3.3.1 Yayılma Tablası (Akma) Deneyi .....	25
3.3.2 Su Emme Deneyi.....	26
3.3.3 Taze Birim Hacim Ağırlık Deneyi .....	27
3.3.4 Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi .....	28
3.3.5 Görünen Porozite Deneyi .....	29
3.3.6 Basınç Dayanımı Deneyi.....	30
3.3.7 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi .....	31
3.3.8 Isıl İletkenlik Deneyi.....	32
3.3.9 Geopolimer Harçların Mikroyapı Analizi (SEM) .....	33
BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA .....	35
4.1 Yayılma Tablası (Akma) Deneyi Sonuçları .....	35
4.2 Su Emme Deneyi Sonuçları .....	35
4.3 Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları .....	37
4.4 Görünen Porozite Deneyi Sonuçları.....	39
4.5 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları .....	40
4.4 Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları .....	42

4.7 Isıl İletkenlik Deneyi Sonuçları .....	43
4.8 Mikroyapı Analizi (SEM) Analizi Sonuçları .....	45
<b>BÖLÜM 5 SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>50</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>59</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: 55×47×3 cm ebatlı, geopolimer esaslı levhalar.....	15
3.1: Uçucu kül. ....	19
3.2: Silis kumu.....	20
3.3: Sodyum silikat.....	21
3.4: Sodyum hidroksit. ....	21
3.5: Vermikülit .....	22
3.6: a. NaOH'ın sulu çözeltisi, b. harç, c. harcın kalıplara yerleşimi, d. numuneler.....	24
3.7: a.Harcın yayılmadan önceki durumu, b. harcın yayılmadan sonraki durumu. ....	26
3.8: Geopolimer harç numunelerinin etüvde kurutulması.....	27
3.9: Geopolimer harç numunelerinin tartılması. ....	27
3.10: Harç dolu kalıpların tartılması.....	28
3.11: Numunelerin sudaki ağırlığının tespit edilmesi. ....	30
3.12: a. Eğilme cihazı, b. numunelerin bölünmesi, c. basınç presi, d.basınç testi... ..	31
3.13: Ultrases geçiş hızı deneyi.....	32
3.14: Isıl iletkenlik tayini .....	33
3.15 a. Numunelerin mile yerleştirilmesi, b. kaplanması ve vakumlanması, c. analizi.....	34
4.1: Geopolimer harçların yayılma çapı değerleri.....	35
4.2: Geopolimer harç numunelerinin su emme oranları.....	36
4.3: Kuru BHA değerleri.....	37
4.4: Taze BHA değerleri. ....	38
4.5: Görünen porozite değerleri .....	39
4.6: Basınç dayanımı değerleri.....	41
4.7: Ultrases geçiş hızı değerleri .....	43
4.8: Geopolimer harç numunelerinin ısıl iletkenlik değerleri .....	44
4.9: K1 numunesinin SEM görüntüsü.....	45
4.10: K3 numunesinin SEM görüntüsü.....	46
4.11: K10 numunesinin SEM görüntüsü.....	47
4.12: K12 numunesinin SEM görüntüsü.....	48

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
<b>1.1:</b> Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı mahaller.....	4
<b>1.2:</b> Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri.....	12
<b>1.3:</b> Silis kumunun kimyasal kompozisyonunun ağırlıkça oranları (%).....	12
<b>3.1:</b> Uçucu külün kimyasal kompozisyonu (%).....	19
<b>3.2:</b> Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	20
<b>3.3:</b> Vermikülitin fiziksel özellikleri.....	22
<b>3.4:</b> Vermikülitin kimyasal kompozisyonunun ağırlıkça oranları (%).....	22
<b>3.5:</b> Geopolimer harçların hacimce oranları ve ağırlıkça değerleri.....	23
<b>3.6:</b> Beton kalitesinin tahmin edilmesi (TS EN 12504-4, ASTM C 597, 2004).....	32
<b>4.1:</b> Birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri (TS 825, 1998).....	43

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
P	: Numuneye Yüklenen Yük (Newton)
$V_{\text{ses}}$	: Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
V	: Hacim ( $\text{cm}^3$ )
$W_{\text{bha}}$	: Birim Hacim Ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$W_{\text{ek}}$	: Etüv Kuru Ağırlık (g)
$W_{\text{kyd}}$	: Kuru Yüzey Doygun Ağırlık (g)
$W_{\text{suda}}$	: Sudaki ağırlık (g)
$\sigma$	: Basınç Dayanımı (MPa)

## KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BHA	: Birim Hacim Ağırlık
FA	: Fly Ash
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu Kül

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1. Beton

Agrega, bağlayıcı eleman çimento, su ve/veya katkı kullanılarak üretilen yapı malzemesine beton denir. Beton üretilmesinde kullanılan agregalar, minerallerden teşkil ve taneli malzemelerdir. Kum, çakıl ve kırmataş beton üretimi için yer alan agregadır. Bu agregalar iri veya ince agregaya olabilir. Türk Standartları (TS) ifadesine bakıldığında; eleme sonucu 4,0 mm delik çaplı elekten üstünde kalan agreganın iri agregaya, elekten geçip elek altında kalan agreganın ince agregaya olduğu anlaşılmaktadır. Çimento, sahip olduğu bağlayıcılık özelliği ile etkin bir malzemedir. Bağlayıcılık özelliğinin kazanılabilmesi için su ile karıştırılması ve reaksiyona girmesi mecburidir. Su ile karıştırıldıktan sonra çimento hamuru elde edilmektedir. Çimento hamurunun buradaki görevi agregaların yüzey alanını kaplamak ve agregaya arasında oluşacak boşlukları doldurarak işlevsel bir rolü olan bağlayıcılığı etkin kılmaktır. Eğer çimento hamurunun içerisinde iri agregaya değil de sadece ince agregaya varsa bu durumda elde edeceğimiz malzeme harç olmaktadır. Çimento hamuru belirli bir süre sonra sertleşir. Bu yüzden ilk saatlerde betona şekil verilebilmektedir. Beton, günümüzde büyük ve/veya küçük birçok yapıda kullanılan en mühim ve yaygın yapı malzemelerinden biridir. Birçok meslek grubunun (inşaat mühendisi, kimya mühendisi, bilim insanları gibi) el ele verip betonu tanıma noktasında çok daha ileri adımlara taşınması var olan sorunları çözmek adına önem teşkil eder. Beton; şekil verilebilmesi, fabrikada üretilip yerine montajının yapılabilmesi, rahat bir şekilde yerleştirilebilmesi, sertleşmiş halde yüksek dayanımların elde edilebilmesi, çelik donatılarla çok iyi bir uyum sağlayabilmesi, ekonomik olması, estetik amaçlara hizmet edebilmesi açısından avantajlara sahip iken, sertleşmiş betonun çekme dayanımının düşük ve gevrek olması, hacim değişikliği gösterebilmesi, sabit yüklemeye maruz kaldığında gitgide kalıcı bozulmalar gösterebilmesi, su geçirimsizliği açısından tam beklentiyi karşılamaması, çok yüksek ağırlıkların taşınması için yüksek ebatlara gerek duyulması açısından da dezavantajlara sahiptir (Erdoğan, 2013).

## 1.2. Uçucu Kül

### 1.2.1. Uçucu Külün Tanımı

Yanma neticesinde oluşan UK'nın %75-85'i baca gazları vasıtasıyla kazandan tahliye olur. Tahliye olan bu ürüne uçucu kül denir. Bu külün oluşmasında santral türü, yakılan kömürün çeşidi, işletim şekli gibi etmenler rol oynarken, genel anlamda elektrik enerjisi amaçlı olan termik santrallerde yüksek derecelere çıkmak için tüketilen taşkömürünün %10-15'ini, linyit kömürü yakılması sonucu %20-50'si kadarı kül şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Santrallerde yakma sonucu oluşan UK'nın çevreye yayılmasını engellemek amacıyla elektrofiltreler kullanılır ve bu sayede tutulurlar. Bu elektrofiltreler iyi derecede verimli diyebileceğimiz filtrelerdir (Morrison, 1970).

### 1.2.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması

UK'nın kimyasal yüzde bileşen oranına göre temel alınan standartlar TS EN 197-1 ve ASTM C 618'dir. ASTM C 618'e baktığımızda iki çeşit UK karşımıza çıkmaktadır. Bunlar C ve F sınıfı uçucu küllerdir (RILEM Committee 73-SCB, 1988; ASTM C618, 1998; TS EN 197-1, 2002).

- F sınıfına, bitüm esaslı kömürün yakılması sonucu oluşan ve totalde  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  oranı %70'ten çok olan küller yer almaktadır. Diğer taraftan kalsiyum oksit (CaO) oranı yüzde %10'un aşağısında olduğundan kireç oranı düşük uçucu küller şeklinde isimlendirilirler. Bu sınıftaki küller puzolan niteliği taşımaktadır.
- $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  değeri %50'nin yukarısında olan, kalsiyum oksit (CaO) oranı yüzde %10'nun altında olan ve yarı bitümlü kömürden veya linyitin yakılması sonucu ortaya çıkan UK'lar C sınıfı UK olarak adlandırılmaktadır. Bu UK'lar silika ve alüminalı ve bir arada tutucu niteliğine sahiptir.

TS EN 197-1'e göre:

Silissi UK'lar (V) ve kalker muhtevalı (W) şeklinde 2 bölüme ayrılmıştır. Reaktif kireç miktarı %10'un aşağısında ise V sınıfı (silissi UK), %10'un üstündeyse W (kalkersi UK) sınıfı olarak adlandırılır.

Antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilen F sınıfı UK puzolanik özelliklidir. Düşük bitümlü kömürlerden veya linyitten elde edilen C sınıf UK hem puzolanik hem de düşük seviyede de olsa bağlayıcı nitelikli olduğundan F sınıfı UK'dan ayrı özelliktedir. Ayrıca kireç oranı %10'un aşağısında olan UK'lar düşük kireçli olarak nitelendirilirken %10'dan çok kireç içeren UK'lar yüksek kireç içeren UK'lar olarak isimlendirilmektedir (Erdoğan, 2013).

### **1.2.3. Uçucu Külün Kullanım Alanları ve Özellikleri**

Uçucu kül, yüksek enerjilere çıkmak için kömür gibi fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan endüstriyel bir atık malzemesi olduğundan çevreyi olumsuz etkilemektedir. Uçucu kül çapı çok küçük olduğundan baca gazları ile taşınır. Hava kirliliğine engel olunması için çeşitli yöntemlerle belirli bir alanda toplanarak depolanır. Ancak bu depolanma doğal olarak o santral için bir sorun teşkil etmektedir. Dünyada senelik aşağı yukarı 600 milyon ton UK elde edilmektedir. Ülkemizde de bu miktar 13 milyon ton civarındadır. Enerjide ithal bağımlılığı azaltmak adına kömürün kullanımı yoluna gidilmesi düşünülecek olursa bu miktarların daha üst seviyelere çıkması beklenmektedir. Bundan dolayı bu atığın değerlendirilmesi adına betonda katkı olarak kullanılmaktadır. Bu, meselenin önemli bir adımı olarak görülse de dünyada UK'nın atık olarak değerlendirilmesi, ortaya çıkan UK'nın yalnızca %15'i civarındadır. Birçok ülkede UK'nın kullanılmaya gidilmesinin başlangıcı, beton üretimi esnasında hidrasyon ısını aşağıya çekmek ve baraj inşaatı esnasında kullanımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde ise 1960'lı senelerinde kullanılmaya adım atılmıştır. Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamalarının yanında Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) de çeşitli köprü ve yol yapımında tecrübe etmek için uçucu kül kullanmıştır. Hazır beton endüstrisinin gelişmeye sürekli açık olması UK'ya olan alakayı git gide arttırmaktadır (Türker vd., 2009).



Beton üretiminde UK katkısı sonucu nihai zamanlardaki dayanımlarının artması planlanmış olup sönmüş kireç  $\text{Ca(OH)}_2$  ve UK'ların arasında değişik metotların kullanılması yoluna gidilmiştir. Çıkan sonuca göre UK'nın yüzey alanı arttıkça puzolanik aktivitede de artış sağlanmıştır. İlk zamanlardaki dayanımların yüksek tutmak için betona yapılacak kür sıcaklığının artması ile alakalı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca alkali aktifleştirici kullanımının da puzolanik tepkimelerinin hızında artış yaptığı dile getirilmiştir (Poon vd., 1999).

Uzbaş ve Aydın (2018)'e göre, UK'nın çimento yerine ikamesi ile elde edilen karışımlara ait Portlandit ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) oranı genel manada azalma göstermiş ve C-S-H oranı artmıştır. Betona UK'nın ilave edilmesi sonucunda ilk dayanımı olumsuz etkilemekle beraber nihai dayanımının arttırdığı görülmüştür. Ayrıca 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı verilerine bakıldığında UK oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinde de azalma olduğu görülmüştür. UK'ların inşaat kolunda kullanıldığı mahaller Tablo 1.1'de gösterilmiştir (Aruntaş, 2006).

Tablo 1.1:Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı mahaller (Aruntaş, 2006).

<b>Malzeme</b>	<b>Kullanım Amacı/Yeri</b>
Agrega	İnce, iri ve hafif agrega olarak
Çimento	Katkı, hammadde, ikame malzemesi olarak
Beton	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Kerpiç	Bir arada tutucu malzeme olarak
Tuğla	Katkı malzemesi olarak
Yapı uygulamaları	Baraj, otoyol, nükleer santral

Yaklaşık 800 adet numune üzerinde yapılan test ve analiz sonuçları göstermiştir ki her ne kadar test edilen hiçbir UK ASTM standartları ile tamamıyla uyuşmasa da bazıları betonda kullanılabilir. Beton bileşimine katılan UK oranı düşük oranlarda ilave edilmesi durumunda iyi denilecek derecede nihai dayanımlı değerler elde edilirken düşük erken dayanımlar elde edilir. Yüksek CaO ve sülfat oranlı C sınıfı UK haricinde kalan UK'ların kullanılmasıyla dayanıklılığı geliştirmek mümkündür (Tunçbilek, 1998).

UK, koyu gri renginde ufak çaplıdır. Renge ait bu koyuluğu veya açık oluşu yanan kömür tipine ve yanan kömürün yanış şekline bağlıdır. Kömürün içindeki yanmayan karbon

miktarı fazlaştıkça renk siyaha kayar. Yanma özelliği iyi derecede olan kömür sonucu meydana gelen uçucu kül rengi açık renge meyillidir (Güler vd., 2005).

Kazana konulan kömürün öğütülme derecesine bağlı olarak uçucu küle ait incelik değişir. Bu duruma diğer bir etmen de uçucu külün bacadan çıkmasına maksimum seviyede engel olmak suretiyle tutulması sayılabilir. Bacadan sızan bölüm azaldığı sürece incelik oranı da artış gösterir. Ebatlar çoğu defa 0,5-200 mikron seviyelerinde dolaşır. Yapı olarak da camsı ve genellikle küresel yapıya sahip parçacıklardır. Özgül yüzey değerleri 1.800-5.000 cm<sup>2</sup>/g dolayında olmakla beraber, ortalama 2.800-3.000 cm<sup>2</sup>/g seviyelerindedir. UK'ların yoğunluk değeri 2,2-2,7 g/cm<sup>3</sup> arasındadır (Yeğınobalı, 2003; Şimşek, 2009).

### **1.3. Geopolimerler**

#### **1.3.1 Geopolimerin Tarihçesi**

Davidovits (2002), 1970-1993 seneleri arasında Fransa'da çıkan ve organik esaslı plastikten kaynaklanan yangın sonrasında yanmaz malzeme üzerine çalışmalar yapmayı amaç edinmiş ve çimentoya alternatif bir bağlayıcı ile elde edilen geopolimerlerin üzerine yoğunlaşmıştır.

Avrupa'nın doğusunda 1950'li senelerde 2. Dünya Harbi sonrası Portland çimentosunun çevreye olan zararlarının anlaşılması sonrasında Glukhovsky ve arkadaşlarınca alüminyum ve silisyum muhteva eden malzemelerin alkali aktivatörler ile tepkimesi sonucu ile alakalı araştırmalar yapılmıştır. Glukhovsky çimentoya karşılık yüksek fırın cürufu kullanarak sorunu ortadan kaldırmaya yönelik girişimlerde bulunmuştur. Bu girişimlerin sonucunda elde ettiği malzemelerin fazlaca dayanıklı olduğu görülmüştür. Geliştirdiği deneysel, yeni, temel ve etkili metotlar bilimsel araştırmaların ileriye yönelik adım atmasını sağlamış, 1970'li senelerde Davidovits tarafından metakaolin katılarak alümina silikatların silikat ve alkali hidroksit çözeltileri ile tepkimesi incelemiştir (Duxon vd., 2008).

### 1.3.2. Geopolimerin Tanımı ve Oluşumu

Geopolimerler, beton üretiminde yeni bir bileşen veya bağlayıcı olarak düşünülebilir. Geopolimerler, adezyon ve kaplamalar için, elyaf takviyeli kompozitler için beton üretiminde yeni bir çimento olarak nitelendirilebilir (Davidovits, 2015).

Alüminyum ve silisyum atomları, tabii kayalara benzer moleküller meydana getirmek suretiyle tepkimeye girerler. Elde edilen inorganik ve polimerik malzemeler, jeolojik feldispatların (mineral) amorf bir eşdeğeridir denilebilir. Fakat organik polimerlerin ısı ile sertleşmesine benzer bir şekilde sentezlenir. Bu sebeple bu ürünler geopolimerler diye isimlendirilirler. Geopolimerlerin oluşumunda yapısal bütünlüğü sağlamak suretiyle tamamıyla farklı bir tepkime rotası çizdiğinden geleneksel Portland çimentosundan yapı itibari ile farklıdır. Puzolanik çimentolar, C-S-H bütünlüğünden meydana gelirken geopolimerler, Al ve Si muhteva eden malzemelerin alkali ortamda aktive olmasıyla başlayan bir dizi reaksiyonlardan meydana gelmektedir (Khale ve Chaudhary, 2007).

Geopolimerler bir inorganik polimer kompozisyonunu üretmek maksadıyla alümin ve silikat muhteva eden malzemelerin alkaliler ile tepkimesi neticesinde elde edilen mahsullerdir. UK termik santrallerde günümüz şartlarında yüksek oranlarda elde edildiğinden ve düşük maliyetli olduğundan alüminosilikat kaynağı olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Öteki endüstri atıklarının da kullanılması neticesinde geopolimer bağlayıcılar geleneksel Portland çimentosuyla mukayese edildiğinde CO<sub>2</sub> miktarını %80 azaltabilecektir (Castel vd., 2014).

Çevre temizliği açısından kıyaslanacak olursa; geleneksel beton üretiminde çimento kullanılmaktadır. Çimento üretimi aşamalarında klinker üretilmesi sürecinde yüksek sıcaklıklara gelinmesi için fazlaca fosil kaynaklı enerji tüketildiğinden fazla miktarda CO<sub>2</sub> salınımı meydana gelmektedir. Geopolimer beton üretiminde ise çevreye daha az CO<sub>2</sub> yayılmaktadır. Bunu gerçekleştiren etmen ise geopolimer reaksiyonları sırasında kalsinasyon aşamasının var olmamasıdır (Duxon vd., 2007a).

Geopolimerlerin sentezi için gerekli bazik nitelikli çözelti periyodik cetvelde yer alan 1. grup elementleri ile oluşturulur. Çözeltinin aktive edilmesi için alkali hidroksit, alkali silikat veya alkali hidroksit-alkali silikat çifti kullanılabilir. Bu iki çözeltinin birbirinden

farkı, alkali hidroksit çözeltisinde silikat muhtevası oldukça azdır. Genel olarak iki çeşit alkali beraber kullanılır. Böylelikle meydana gelen geopolimer esaslı ürünler kullanılan aktifleştirici türüne göre meydana gelen oluşum ve nitelik bakımından farklılıklar oluşabilmektedir (Khale ve Chaudhary 2007; Sagoe-Crentsil ve Weng, 2007).

Geopolimerizasyon temelinde alüminyum ve silisyum tanelerinin çözünme, taşınma ve polimerizasyon adımlarından meydana gelmektedir. Çözünebilir silikatların eklenmesi, çözülmüş silisyumun derişimini arttırabilmektedir. Jel fazı içerisindeki Si/Al oranı ve hammaddenin yapısı (amorf) geopolimerizasyona tesir eden önemli unsurlardır (Fernandez Pereira vd., 2009).

Geopolimerizasyon prosesi sanayi atıkları, (UK, silis dumanı vb.) volkanik tüf, ufalanmış tabii metamorfik kayalar veya metakaolinit gibi dehidrasyona maruz kalmış aluminosilikat yapıdaki toprak katılarıyla, alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda reaksiyona girmesi ile başlar. Üretilen malzemenin kabul talep edilen gayeye uygun fiziksel özelliklerini sağlaması; katı hammadde kompozisyonu, söz konusu kimyasalların lazım olan derişimlerde karışımı yapılarak reaksiyona sokulması, uygulanan ısıl kür ya da kalsinasyon işlemi, kalsinasyon ısısı ve sürecine dayanan bağı olarak değişkenlik gösteren molekül yapısı ile alakalıdır (Davidovits, 2008).

Aktivatör derişiminin geopolimerlerin basınç dayanımları üzerindeki etkisi önem arz etmektedir. Fakat bu konsantrasyonun değerleri optimum seviyede olmalıdır. Bu değerlerde basınç dayanımında ilerleme kaydedildiği söylenebilir. Bu değerlerin haricinde ürünün geopolimer yapısında değişiklik etkeni alkali aktive edilmiş matriste mevcut olan serbest haldeki hidroksit iyonlarından ötürü tam tersi durum da yaşanabilmekte ve malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da meydana gelebilmektedir. Kür sıcaklığı ve yaşı da ayrıca örneklerin basınç dayanım değerlerinde değişiklik yapabilen parametrelerdir. Bu parametrelerin faal olabilmesi için aktivatör derişimin eşik değerin altında olmaması gerekir. Alümina ve silikanın belli değerdeki ölçü kadarı polimerizasyon süre aralığında çözülüp hammadde parçacıklarının yüzey hidrolizini arttırmak suretiyle güçlü bir alkali çevreye ihtiyaç bulunmaktadır. Bu durumun gerçekleşebilmesi ise için ortamda aktive edici etken olarak isimlendirilen tek veya kombine alkali çözeltiler ile sağlanmaktadır (De Vargas vd., 2011).

UK'nın yapısında amorf silika ve alümina yer almakta ve söz konusu iyonların çözünmesi için genellikle alkali çözeltiyle temas kurulması yoluna gidilmektedir. Alkali çözelti UK ile temas ettiğinde silikatlar çözülmeye başlar. Geopolimerizasyon temelde alümina silika bağına göre değiştiği için UK'ların geopolimer harç veya beton üretiminde yer alması isabetli olacaktır(Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

Geopolimer üretiminde F sınıfı uçucu külün geopolimer üretimi için olumlu bir katkı malzemesi olduğu ayrıca bunun aktive edilmesinde sodyum hidroksit daha etkili bir aktifleştirici özellikli olduğu ifade edilmiştir. Sodyum silikat bileşiği ile sodyum hidroksit bileşiğinin beraber kullanımı sonucu daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir (Fernando-Jimenez vd.,1999). Bunun sebebi ise sodyum silikatın geopolimerizasyon aşamasında, silisyumlu tepkimelerin sayısındaki artış ile beraber tepkimenin çıkan tarafı olan ve Si içeren ürünlerin miktarında da artış sağlayacağı, sonrasında da basınç dayanımında daha fazla kazanım elde edileceğidir (Criado vd., 2005).

Pacheco-Torgal vd. (2008)'in yapmış olduğu çalışmada cam suyunun alkali aktive edici ile beraber kullanılması sonucunda eğilme ve basınç dayanım değerlerinde artış görüldüğü, toz halindeki cam suyu, likit durumundaki cam suyuna göre kıyaslandığında tepkime sonucu değerlerine göre daha düşük performanslıdır.

Geopolimerlerin elde edilişi çoğunlukla sıcaklığın düşük ve uçucu külün aktive edilmiş olmasıyla gerçekleşir. Termik santrallerde oluşan ve beton üretiminde çimento yerine kullanımı olan puzolanik özellikli endüstriyel atık malzemesine uçucu kül denir. UK'nın yapısında mevcut olan silisyum dioksit ve alüminyum oksit bileşikleri, Portland çimentosunun hidrate olması ile meydana gelen kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek puzolanik tepkimesinin başlamasına sebep olur. UK'nın Portland çimentosu yerine kullanılabilmesine olanak sağlayan etken budur. UK'nın yapısındaki amorf silika ve alümina oranı yüksek olup alkali çözelti ile karıştırılıp bunun çözülmesi sağlanmaktadır. UK alkali çözelti ile irtibata geçtiğinde silikatların çözülmeye start verme evresi başlamaktadır. Geopolimerizasyon temelde alümina silika zinciri temelli olduğundan uçucu küllerin geopolimer üretiminde rol alması uygun düşmektedir. Buna ilave olarak alkali solüsyonun derişimi ve türü, UK'nın etken olmasında önemli husustur. Alkali

çözeltilerden sayılan  $Al^{3+}$  ve  $Si^{4+}$  iyonlarının çözülmesi, KOH çözeltisine göre daha ileri seviyedir (Rattanasak ve Chindapasirt, 2009).

Geopolimer oluşumunu sağlayan bağlayıcılar aktif ya da reaktif olmayan dolgu malzemelerinin birbirine bağlanmasını sağlayarak bir çimento malzemesi gibi rol oynayabilir. Temelde kristal fazların geopolimerizasyona dahil olmadıkları gibi esas malzemedeki amorf fazlar da geopolimerlere tamamıyla dönüşemeyebilirler. Geopolimer eldesinde reaktif hammaddeleri geopolimerizasyon tepkimesine dahil etmek maksadıyla ilgili malzemeler ve alkali solüsyonun kısa zamanlı olmayan (15 dakika ve daha fazla süre ile) karıştırılması gereklidir (He vd., 2012).

Üretilen geopolimer beton veya harçların derişim değeri arttıkça mevcut silisyum ve alüminyumun yüksek derişimlerde çözünmesinden ötürü üretilen numunelerin basınç dayanımı da artış göstermektedir. OH derişimi fazla olduğunda UK'nın çözünme hızı artmakta ancak OH derişimi çok fazla olduğunda ilk yaşlarda düşük değerli basınç dayanımına sebebiyet veren  $Al_2SiO_3$  jel çökelek oluşturur (Somna vd., 2011).

### **1.3.3. Geopolimerin Kullanım Alanları**

Birçok endüstriyel ve bilimsel alanlarda geopolimerlerin özellikleri araştırılmaktadır. Modern inorganik kimya, fizikokimya, kolloidal kimyası, mineraloji ve her türlü mühendislik teknolojisi uygulamalarında araştırılmaktadır. Yangına dayanıklı malzemelerde, dekoratif taş eserlerde, düşük teknoloji ürünü bina malzemelerinde, seramik karolarda, refrakter malzemelerde, biyoteknolojide (medikal uygulamalarda kullanılan malzemeler), döküm sanayi, çimento ve betonlar, altyapı için kompozitlerde, tamir ve güçlendirmede, uçak iç mekanlarında ileri teknoloji ürünlerin üretiminde, otomobillerde, yüksek teknolojili reçine ürünleri, radyoaktif ve toksik atık önlemede, sanat ve dekorasyon, kültürel miras, arkeoloji ve bilimler tarihi gibi alanlarda malzeme üretimlerinde kullanılır. Geçmişte, Fransa'daki çeşitli felaketli yangınlardan dolayı organik geopolimer kimyasına yönelme olmuştur. Bu yönelmelerde amaç yanmaz ve yanıcı olmayan plastikler üzerine olmuştur (Davidovits, 2015).

## **1.4. Vermikülit**

### **1.4.1. Vermikülitin Tanımı**

Vermikülit, mineralojik anlamda yalnız başına ayrı bir grubu ifade eder. Ayrıca endüstriyel anlamda genişleşebilme yapısı itibarıyla bütün mika grubu minerallerini de içeren genel bir kavram olarak nitelendirilebilir. Vermikülit kavramını alüminyum, sulu magnezyum, alüminyum veya demir silikat şeklinde isimlendirilebilir. Vermikülitin türlere ayrılması tabiatta oluşumuna ve içinde yer aldığı çevreye göre 4 farklı türe ayrılmıştır (DPT, 2001).

### **1.4.2. Vermikülitin Üretimi**

Açık ocak işletmeciliği ile vermicülit üretimi yapılmaktadır. Vermikülit ocaklarına uzak olmayan alanlarda kurulan cevher zenginleştirme biriminde zenginleştirme işlemi yapılarak genişleştirme prosesine tabi tutulur. Ocaktan alınan cevher birincil kırıcıdan geçilip yaş elek metoduyla harmanlama yapılır ve dallarına ayrılır. Harmanlama prosesi bittikten sonra konsantreler bir araya getirilir, kurutma işlemi yapılır ve ebatlarına ayrılarak genişleştirme birimine iletilir. Genleşme biriminde, 900- 1000 °C sıcaklık altında 4-8 saniye bekletilir. Şok ısıya tabi tutulduktan sonra genişleştirilir ancak genişlemeyen bölümler harmanlama ile diğerlerinden ayrılır. Daha sonra genişleyen ürün paketlenerek sunulur. Türkiye’de vermicülit rezerv alanları; Sivas-Yıldızeli ve Malatya illerinde mevcuttur.

### **1.4.3. Vermikülitin Kullanım Alanları**

Tabii vermicülitin kullanım alanı kısıtlı iken işlemlerden geçilmiş vermicülitin, özellikle ısı yalıtımlı malzemeler üretmek suretiyle geniş kullanım alanları mevcuttur. 1950’li senelere dek vermicülit yalnız inşaat dalında ısı yalıtım özelliğiyle dolgu malzemesi ve blok olarak kullanılırken, hafif agregalar halinde sıva ve alçılarda kullanılmıştır. 1950’li senelerde vermicülitin fiziksel ve kimyasal niteliğinin araştırılması ile vermicülitin öteki mahallerde değerlendirilebileceği ortaya çıkmıştır (Toksoy, 1997).

Vermikülit ısıya dayanıklı yalıtım maddesi olarak yalıtıcı tuğla-blok yanma haznesi, boru kaplamasında kullanılır. Genleşmiş özellikli vermikülitin ince taneleri tarımda ve seracılıkta bol tüketilir. Vermikülit Portland çimentosuyla karıştırıldığında hafif nitelikli izolasyon betonu üretilip döşeme ve diğer yapı elemanlarında kullanılabilir (Okucu, 1992).

Bir malzeme yüksek sıcaklığa maruz kaldığında boşluklu yapısından ve bünyesinde bulunan sudan dolayı mevcut suyun buharlaşması ve arka yüzeye ilerlemesi suretiyle ısı enerjisinin bir bölümünü bu sayede harcayıp yangının kolayca ilerlemesini engellemektedir. Bünyedeki mevcut su tükendikten sonra arka yüzeydeki sıcaklık artışı daha fazla olduğundan dolayı su tutucu özelliği bulunan vermikülit gibi katkıları kullanılmaktadır (Leiva vd., 2005).

Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğünce yapılan inceleme ve araştırmalar neticesinde iyi kaliteli 2.750.000 ton ve kalitesi düşük 2.475.000 ton işlenmemiş vermikülit cevheri tespit ve rapor edilmiştir. Vermikülit içerikli malzemeler, barındırdığı boşluk miktarı fazlalığından dolayı hafif olurlar. Bu da enerji tasarrufu demektir. Binalarda yazın serinlemek, kışın ısınmak için harcanan enerji tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de kayda değer oranlardadır. Türkiye’de elektrik kullanan hane sayısı yaklaşık 25 milyon dolayındadır. Bu kadar fazla sayıda hane olduğuna göre ısı yalıtımlı ve hafif malzemelerin kullanılması ülke ekonomisi, enerji tasarrufu (yaklaşık 10 milyar dolar) enerjide bağımlılığının azaltılması yolunda önemli bir adım olacaktır (Doğan ve Şener, 2004).

### **1.5. Alkali Aktivatörler**

Genel olarak alkalilerle aktive edilmiş çimento ve betonlarda kostik alkaliler ya da alkali tuzlar, alkali aktivatörler olarak kullanılmaktadırlar. Kimyasal kompozisyonlarına bağlı olarak alkali aktivatörler, kostik alkaliler; silikasız zayıf asit tuzları, silikatlar, alüminosilikatlar ve silikasız güçlü asit tuzları olarak altı grupta sınıflandırılmıştır. Tüm bu aktivatörler hem yaygın kullanımlı hem de ekonomik kimyasallardandır (Shi vd., 2006).

Kantarcı (2013)’e göre aktivatörlerin kimyasal özellikleri Tablo 1.2’de verilmiştir.



Tablo 1.2: Sodyum hidroksit ve sodyum metasilikatın kimyasal özellikleri.

Özellikler	Sodyum Hidroksit	Sodyum Metasilikat
Molekül formülü	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
Molekül kütlesi (g/mol)	40,00	122,06
Renk	Beyaz	Beyaz
pH	13-14	-
Bağıl yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,13	1,38
Na <sub>2</sub> O içeriği (%)	-	8,9
SiO <sub>2</sub> içeriği (%)	-	28,7

## 1.6. Silis Kumu

Silis kumu ısı yalıtımlı hafif nitelikli yapı malzemeleri alt grubunda yer almaktadır. Granit türü kayaların birbirinden ayrılması neticesinde meydana gelen 2 mm'den daha aşağıda silis yapılı taneciklerdir. Ortalama yüzey alanı çıkarılan mahallere göre değişiklik göstermesine karşın aşağı yukarı 100-200 m<sup>2</sup>/g aralığındadır. Refrakter sanayide silika tuğla üretiminde, döküm ve cam sanayide değerlendirilmektedir. Kullanılan mahalleri belirlemede etken parametre Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO, CaO, Cr, Co, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> değerleri ve endüstrilerin ihtiyaçlarına uygun fiziksel parametrelerdir. Silis kumunun (Zonguldak-Kozlu) kimyasal kompozisyonu Tablo 1.3'te verilmiştir (Kuşun ve İpekoğlu, 1995).

Tablo 1.3: Silis kumunun kimyasal kompozisyonunun ağırlıkça oranları (%).

Bileşik	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Kızdırma Kaybı
%	98,40	0,72	0,38	-	0,02	-	0,01	0,02	0,25

Pacheco-Torgal vd. (2008)'in yapmış olduğu çalışmada cam suyunun alkali aktive edici ile beraber kullanılması sonucunda eğilme ve basınç dayanım değerlerinde artış görüldüğü, toz halindeki cam suyu, likit durumundaki cam suyuna göre kıyaslandığında tepkime sonucu değerlerine göre daha düşük performanslıdır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

Alkali tuz muhtevasının geopolimer cephe kaplama malzemesi niteliklerine olan tesirinin incelendiği çalışmada, alkali aktivatörler olan potasyum hidroksit ve sodyum hidroksitin uçucu külü aktive etmek için beraber kullanılmıştır. Derişimler 6M ve 9M olarak belirlenmiştir. Bu belirlenen çözelti hazırlandıktan sonra oda sıcaklığında ve 24 saat olmak üzere bekletilmiştir. Daha sonra uçucu kül, alkali çözelti (NaOH ve KOH sulu çözeltisi) 180 saniye boyunca karıştırılmıştır. Ardından karışıma cam suyu solüsyonu ilave edilerek 1 dakika daha karışımı yapıldıktan sonra kum ilave edilip 3 dakika daha karıştırma işlemine devam edilip sonlandırılmıştır. Karışımı oluşturmak için eklenen cam suyu solüsyonunda  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranına 3 olacak şekilde karar kılınmıştır. Söz konusu çalışma sonucunda NaOH kullanılan numunelerde derişim arttıkça görünen porozite değerlerinde azalma meydana geldiği, su emme değerlerinde artış olduğu görülmüştür (Görhan ve Kürklü, 2014).

Hafif agrega ve bağlayıcı olarak geopolimer gibi geliştirilmiş vermikülit üretim ve hafif kompozit panel özellikleri incelenmiştir. Geopolimer bağlayıcı (metakaolin ya da alümina bazlı) ve geliştirilmiş vermikülit içeren kompozit bileşimler test edilmiştir. Üretilen kompozitin mikroyapı analizi yapılmış, termal ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. Ortalama dayanım ve ısıl iletkenliği sırasıyla yaklaşık 2 MPa 0,2 W/mK iken yoğunlukları, 700 ile 900  $\text{kg/m}^3$ , arasında değişmektedir. Sonuçlar, hafif kompozitlerden termal ve mekanik özelliği yüksek bir yapı malzemesinin elde edilebildiğini göstermektedir (Medri vd., 2015).

Olivia ve Nikraz (2012) UK ile geopolimer beton üretimi yaparken en iyi karışım oranı belirlenmek suretiyle mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Burada bazı parametrelerin (agrega içeriği, kür sıcaklığı vs.) oranı değiştirilerek çeşitli sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deney sonucunda elde edilen numunelere bakıldığında, yüksek dayanımlı, normal çimentoya kıyasla elastisite modülü daha düşük ancak çekme ve eğilme mukavemeti daha yüksek değerler elde edilmiştir. Ayrıca ağırlık kayıpları da daha yüksek olmuştur.

Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak elde edilen örneklerin kuru birim ağırlıkları 780-1200 kg/m<sup>3</sup>, porozite değeri, %28,9-39,5 arasında değıştiği belirlenmiştir. Karışımlarda genleştirilmiş vermikülit miktarının artışı ile numunelerin kuru birim ağırlık değeri azalmaktadır. Genleştirilmiş vaziyetteki vermikülitin kullanımı yangına dirençli levha malzemesinin üretiminde popülerlik kazanmıştır. Kullanım mahalleri olarak dolgu malzemesi ve başka bağlayıcı maddeler ile beraber akkor seviyeli sıcak dökümlerin iletiminde, ergimiş metalin üzerinin kapanması olarak sayılabilir. Ayrıca kimyasal maddelerin iletiminde kullanılan sıcak borular ve buhar borularının ısı yalıtımında kullanılmaktadır (Kaya, 2011).

Başka bir çalışmada sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit bazlı, UK ve alkali çözeltilerin aktivasyonu ile ilgili özellikleri araştırılmıştır. Meydana gelen ürün özellikleri amorf alümina silikat jel gibidir. Numunenin kür sıcaklığı ve kür süreci ile çözeltiler/UK oranının farklı olduğu durumlarda ele alınmıştır. Bu parametrelere sahip karışımların etkileri incelenmiştir. Alkali aktiviteli uçucu kül içerikli numunelerin ilk beş saat sonucunda basınç dayanımının 60 MPa değerlerine ulaştığını açıklanmıştır (Palomo vd., 1998).

Ali (2016)'nın yapmış olduğu çalışmanın raporuna göre UK içerikli geopolimer betonun Portland çimentosu içerikli betona göre hem çevre dostu olması hem de daha uygun olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmaya göre bakıldığında UK temelli geopolimer harçların karma süresi ve dinlenme süresi (4 dk. ve 16 dk.) dayanım değerlerinde artış meydana gelmiştir. UK temelli geopolimer harcın karılma süreleri artışı, beraberinde basınç dayanımı ve yoğunluk değerlerinde artış sağlamıştır. Numunelerin kalıplara dökülüp kür yöntemi uygulanana dek geçen süre olan dinlenme süresi arttıkça basınç dayanımı değerleri artış göstermiştir.

Hardjito vd. (2005)'in yapmış olduğu çalışma neticesinde yüksek molariteli sodyum hidroksit aktifleştirici içeren numunelerde yüksek basınç değerlerine ulaşılmıştır. Kütlece yüksek sodyum silikat /sodyum hidroksit oranlı harç karışımlarında yüksek basınç değerlerine ulaşılmıştır. 30 °C ve 90 °C sıcaklık değerleri aralığında kür sıcaklık değerlerine sahip numunelerde sıcaklık artışıyla beraber basınç dayanımlarında da artış görülmüştür. Uzun süreli küre tabi tutulan numunelerin yüksek performanslı ve dayanımlı olduğu görülmüştür.

Şekil 2.1’de hafif agregalı vermikülden imal, geopolimer esaslı levhalar üretilmiştir.



Şekil 2.1: 55×47×3 cm ebatlı, geopolimer esaslı levhalar.

Şekil 2.1’de kalıp sökümü sonrası 55×47×3 cm ebatında üretilen panel örneğini göstermektedir. Her bileşimin ağırlığı 6 kg iken levhaların ulaştığı son büzülme oranı %2’den düşüktür. Kullanım özellikleri açısından, her modülün uygun ölçü ve ağırlığına sahip panellerin montaj ve demontaj işlemlerinde kullanılabileceği görülmüştür. Genleştirilmiş vermikülit ve geopolimer esaslı levhaların 11 gün süreyle damıtılmış suya daldırıldıktan sonra emilen su miktarı ve kurutulduktan sonraki ağırlık kaybı ölçülmek suretiyle sudaki kararlılığı test edilmiş ve numunede hasar meydana gelmediği anlaşılmıştır. Vermikülit içeren ve farklı oranlarda hammadde kullanılmasına rağmen ağırlık kaybı ve suyun emilimi miktarında önemli bir değişme meydana gelmediği gözlenmiştir (Medri vd., 2015).

Mahmut (2015) yapmış olduğu çalışmada, alkali aktivatör olarak sıvı halde bulunan sodyum silikat ve katı sodyum hidroksit katkı olarak cüruf kullanılmıştır. Öncelikle alkali aktivatör payına düşen toplam hacmin yarısı olacak şekilde denk gelen aktivatör miktarı kadar NaOH bir miktar su ile bir kaptaki karışımı yapılması sağlanmıştır. Su içerisinde çözünmesi sağlandığında ise geri kalan hacmin yarısına denk gelen  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ilave edilmiştir. Toplam karışımın homojenliğinin sağlanması amacıyla bu karışım karıştırma aleti haznesine konulmuştur. Ardından cüruf ve kum 30 saniye periyotlarla ilave edilip karışım prosedürünün tamamlandığı anlaşılmıştır.

Prizini tamamlamış harç karışımlarının nemli veya sulu ortamlarda bekletildiğinde yüzeylerinde beyaz renkli kabarmış vaziyette leke oluştuğu tespit edilmiştir.

Akativatörlerin molarite değeri arttıkça priz karışımların numune başlangıç süresi ve prizin sona erme süresi azaldığı görülmüştür. Genel anlamda molaritenin artışına bağlı olarak üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanım değerlerinde artma gözlemlenmiştir. Maksimum basınç dayanımına 90°C sıcaklık ve 12 molariteli, 2 günlük süreli numunelerde ulaşılırken, minimum basınç dayanımı değerlerine ise yine aynı sıcaklıkta ancak 6 molariteli, 4 gün sonundaki numunelerde meydana geldiği anlaşılmıştır. Aktivatörlerin mol değerlerindeki artışla beraber yayılma çaplarında bir azalış sağlamıştır. Hiç bir karışımın yoğunluk değeri 1800 kg/m<sup>3</sup> değerini aşmadığı, karışımlardaki bir günlük birim ağırlık değerlerine, molarite ve sıcaklık değerlerinin artmasıyla beraber azalış olduğu gözlenmiştir. Sıvı halde sodyum silikat ve katı halde sodyum hidroksit maddelerinin belirli oranlarda birlikte kullanıldığında meydana gelen tepkime sonucu bağlayıcılık vasfı kazanan geopolimer oluşumuna sebep olduğu görülmüştür.

Ali (2016)'nın yapmış olduğu çalışmada, alkali aktivatör ve çimento ile birlikte aktifleştirilmiş UK'lı geopolimer harçların mekanik özellikleri ile ilgili yapılan çalışma sonucunda şu verilere ulaşılmıştır: Üretilen harç numunelerde, işlenebilirliğin, katılan iki aktifleştirici (NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) için de bir iyileştirme meydana getirdiği görülmüştür. Bunun da uçucu külün yapısı (camsı ve küresel) ve ikamesi ile ilintili olabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca uçucu kül oranı arttıkça işlenebilirliğin arttığı görülmüştür. NaOH ile aktive edilen karışımlarda 180 gün itibari ile uçucu kül muhteviyatı %75 için performansın iyi derecede olduğu ve basınç dayanımının 40 MPa değerlerinde olduğu görülmüştür. Uçucu kül muhteviyatı maksimum oranda (%100) olan karışımların basınç dayanımının 27 MPa değerine ulaştığı, ilk bir hafta dayanımsız sonuçlar veren karışım için olumlu bir neticedir. NaOH, UK ve çimento içerikli karışımların eğilme dayanımı değerleri için de yakın sonuçlara varılmış, eğilme dayanımlarındaki gelişme basınç dayanımlarındaki gelişmeye oranla daha iyi olmuştur. Aktivatör olarak sodyum meta silikat içerikli karışımlarda çimento ve uçucu külün beraber katılması suretiyle bir optimal değere ulaşılamazken, bu tür karışımlarda çimento kullanımının yararlı olmadığı sonucuna varıldığı görülmüştür. Harç karışımının şu şekilde hazırlandığı görülmüştür: Elde edilen harç karışımlarda kum/bağlayıcı yüzdesi 3'tür. Su/bağlayıcı yüzdesi ise NaOH içeren karışımlarda 0,33 iken, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ilaveli karışımlarda 0,47 olarak belirlenmiştir. Harç karışımlarında, çimento ve uçucu kül sıfırdan itibaren %25 oranında git gide artacak şekilde ilave edilmiştir. Harç karışımları hazırlanırken sodyum hidroksitin karışım suyu

içerisinde çözünmesi sağlanmış ve minimum yarım gün kadar zaman sonra soğuması beklenmiştir. Daha sonra hazırlanan alkali çözelti harç karışımına katılmıştır. Elde edilen numuneler  $20 \pm 2$  °C sıcaklıkta ve nem yüzdesi  $60 \pm 5$  olacak şekilde iki ayrı kür metodu izlenerek deney yapılacak güne kadar bekletilmiştir (Ali, 2016).

Katkının dozajı  $400 \text{ kg/m}^3$ , silis modülü 1,35 ve ağırlıkça sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) değeri 9,13 şeklinde amaçlanan bir çalışmada aktifleştiricilerin miktarı tespit edilmiştir. Agreganın total hacmini tespit etmek için söz konusu malzemelerin hacmini  $1 \text{ m}^3$ 'ten çıkarılmıştır. Karışımı oluşturmak için gerekli malzeme miktarları 1 gram hassasiyetine sahip elektronik tartıda belirlendikten sonra, geopolimer beton örneklerini oluşturmak için, önce alkali aktivatörler beş dakika boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında çüruf, kum ve iri agregalar ilave edilerek tekrar karılmıştır. Elde etmiş olduğu sonuçlar şunlardır: Kür süreleri arttıkça basınç dayanımı değerlerinde artış olduğu, numuneler yangın deneyine tabi tutulduktan sonrası basınç dayanımı değerleri 13,21-38,36 MPa arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür (Kantarıcı, 2013).

Isıl işlemin geopolimer üzerine tesiri incelenen bir çalışmada, Alkali aktivatörler NaOH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve KOH olarak belirlenmiştir. Burada pH etkisi incelenmek istendiğinden derişimler 4M, 8M, 12M olarak 3 değişik biçimde çözelti hazırlanmıştır. Deney öncesi (1 gün önce) hazırlanmış olan alkali çözeltiler karışıma katılmadan önce yine karıştırılmıştır. İşlenebilirlik ve yüksek dayanımlı basınç değerleri elde edebilmek için alkali çözeltinin sodyum silikata oranı 0,5-2,0 arasında olmak üzere ve aktifleştirici çözeltinin uçucu küle oranı ise 0,35-0,5 aralığında olacak şekilde deneme yapılmıştır. Kütlece olmak şartıyla alkali çözelti/sodyum silikat oranının 1'e eşit olduğu, alkali aktifleştiricinin uçucu küle oranı ise 0,4 olan örneklerde en yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Burada karışım hazırlanırken, sodyum silikat ve alkali çözelti mekanik karıştırıcı ile hızı 2000 rpm (1 dakika içerisindeki dönüş/devir sayısı) olmak üzere 15 dakika boyunca karıştırılıp alkali aktifleştirici hazırlanmıştır. Daha sonra bu karışım uçucu küle birleştirilip mekanik karıştırıcı vasıtasıyla yine aynı hızda 15 dakika boyunca karışımı yapılmıştır. Karışımlar önceden yağlanan kalıplara dökülüp 60 kez sarsma tablasında sarsılması yapılmıştır. Söz konusu çalışmaya göre: bazı numunelerin ısıl işleme rağmen basınç dayanım değerlerinde azalma meydana geldiği, molarite artışıyla beraber Al-O ve Si-O bağlarında gevşeme meydana geldiği görülmüştür (Arıöz, 2015).

Metakaolin ilaveli geopolimer malzeme üretimi yapılan çalışmada, malzeme oranları belirlendikten sonra optimizasyon sonucu hazırlan çözeltiler 1 gün öncesinden hazırlanarak oda sıcaklığında soğuması için bekletilmiştir. Ağırlıkça %80 UK ve %20 kil olan karışımlar önce kuru olacak şekilde 30 saniye boyunca karıştırılmış sonrasında NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışıma katılarak 3 dakika daha karıştırılıp karışım işlemi sonlandırılmıştır. Ağırlıkça NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> miktarları toplamının uçucu kül ve metakaolin toplamına oranı 0,36 ml/g, NaOH derişimleri 9M, 12M ve 15M, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı: 2,0, karıştırma süresi 5+5 (10) dakika olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Görünür yoğunluk değerlerinin kür süresi artışıyla beraber arttığı, 90 gün sonunda metakaolin katkılı numunelerin basınç dayanım değeri 50 MPa'yı aştığı, molarite arttıkça görünen porozite değerlerinde düşme meydana gelirken su emme değerlerinde de azalma meydana geldiği görülmüştür (Girgin, 2016).

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

Karışımları oluşturmak için kullanılan malzemeler; uçucu kül, silis kumu, şebeke suyu, sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve vermikülitten oluşmaktadır.

##### 3.1.1. Uçucu kül

Araştırmada kullanılan UK; Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiştir (Şekil 3.1). Bağlayıcılık sağlaması amacıyla katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Kullanılan UK'nın TS EN 450-1'e göre yapılan tetkik sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranının %70' ten yüksek ve CaO miktarı %10' dan az olduğundan dolayı F sınıfı UK (düşük kireçli) grubuna girmektedir. UK'nın özgül yüzey değeri  $3.450 \text{ cm}^2/\text{g}$ , özgül ağırlığı 2.35, kızdırma kaybı %2,94 değerindedir.

Tablo 3.1: Uçucu külün kimyasal kompozisyonu. (%)

Oksit	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	Cl	$\text{Na}_2\text{O}$
UK	55,20	25,28	8,24	1,17	1,80	0,59	0,01	3,15



Şekil 3.1: Uçucu kül.



### 3.1.2. Silis Kumu

Deneylerde kullanılan kum, silis kumu olup Bartın İli Yazlar firmasına ait Beton Şantiyesinden temin edilmiştir. Agrega olarak kullanılmıştır (Şekil 3.2). Kumun çapı 0,05-2,00 mm olup özgül yüzey alanı 100-200 m<sup>2</sup>/g arasındadır. Kum %97,84-%98,40 arasında SiO<sub>2</sub>, %0.72-%0,97 arasında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0.21-%0.38 arasında Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine sahiptir.



Şekil 3.2: Silis kumu.

### 3.1.3. Su

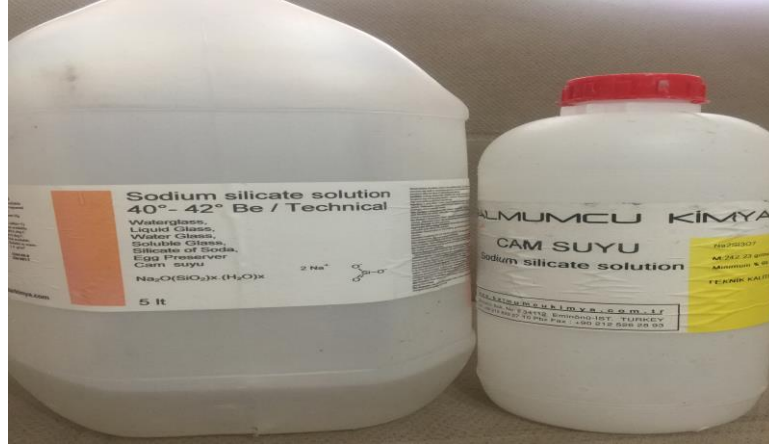
Çalışmada Bartın İli şebeke suyu kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin molar derişiminin hazırlanmasında ve hazırlanan harç karışımlarında kullanılmıştır.

### 3.1.4. Sodyum Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

Uçucu külü aktifleştirmek için kullanılmıştır. Sıvı haldedir. Vizkoz bir görünümü ve özelliği vardır. Cam suyu olarak da bilinir. Elle temas ettiğinde yapışkan hissi verir. Sodyum hidroksit ile beraber kullanılmıştır (Şekil 3.3).

Tablo 3.2: Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Parametre	Minimum	Maksimum
SiO <sub>2</sub> (%)	26,50	31,50
Na <sub>2</sub> O (%)	8,20	9,50
Modül (SiO <sub>2</sub> / Na <sub>2</sub> O)	3,10	3,60
Yoğunluk (20 °C, g/cm <sup>3</sup> )	1,38	1,42
Vizkozite ( 20 °C, C poise)	300	1200



Şekil 3.3: Sodyum silikat.

### 3.1.5. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Uçucu külü aktive etmek için cam suyu ile beraber kullanılmıştır. Katı halde temin edilmiştir. Mol ağırlığı 40.00 g, saflık minimum % 99'dur (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Sodyum hidroksit.

### 3.1.6. Vermikülit

İnce agrega olarak kullanılmıştır. Isı yalıtımlı, sıkıştırılabilen, su emme kabiliyeti yüksek, hafif, yüksek ısıya maruz kaldığında genişleyen (yaklaşık 30 kata kadar) bir mineraldir (Şekil 3.5). Fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te, kimyasal kompozisyonunun ağırlıkça oranları Tablo 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Vermikülit

Tablo 3.3: Vermikülitin fiziksel özellikleri.

Tablo 3.3: Vermikülitin fiziksel özellikleri.

Çap	Yoğunluk	Renk	pH	Su Tutma
3 mm altı	90-130 kg/m <sup>3</sup>	Açık kahve	7.5	Hacimce %40

Tablo 3.4: Vermikülitin kimyasal kompozisyonununun ağırlıkça oranları (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Diğer
38-46	10-16	16-35	1-5	1-6	6-13	1-3	8-16	0,2-1,2

## 3.2. Deneysel Çalışmalar

### 3.2.1. Geopolimer Harç Karışımlarının Oranlarının Belirlenmesi

Geopolimer harç üretiminde; bağlayıcı olarak UK'yı aktive etmek için  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH, karışım suyu, ince agrega olarak vermikülit ve silis kumu kullanılmıştır. Tablo 3.5'te 1000  $\text{cm}^3$  için hacimsel oranlar ve ağırlıkça değerleri verilmiştir.

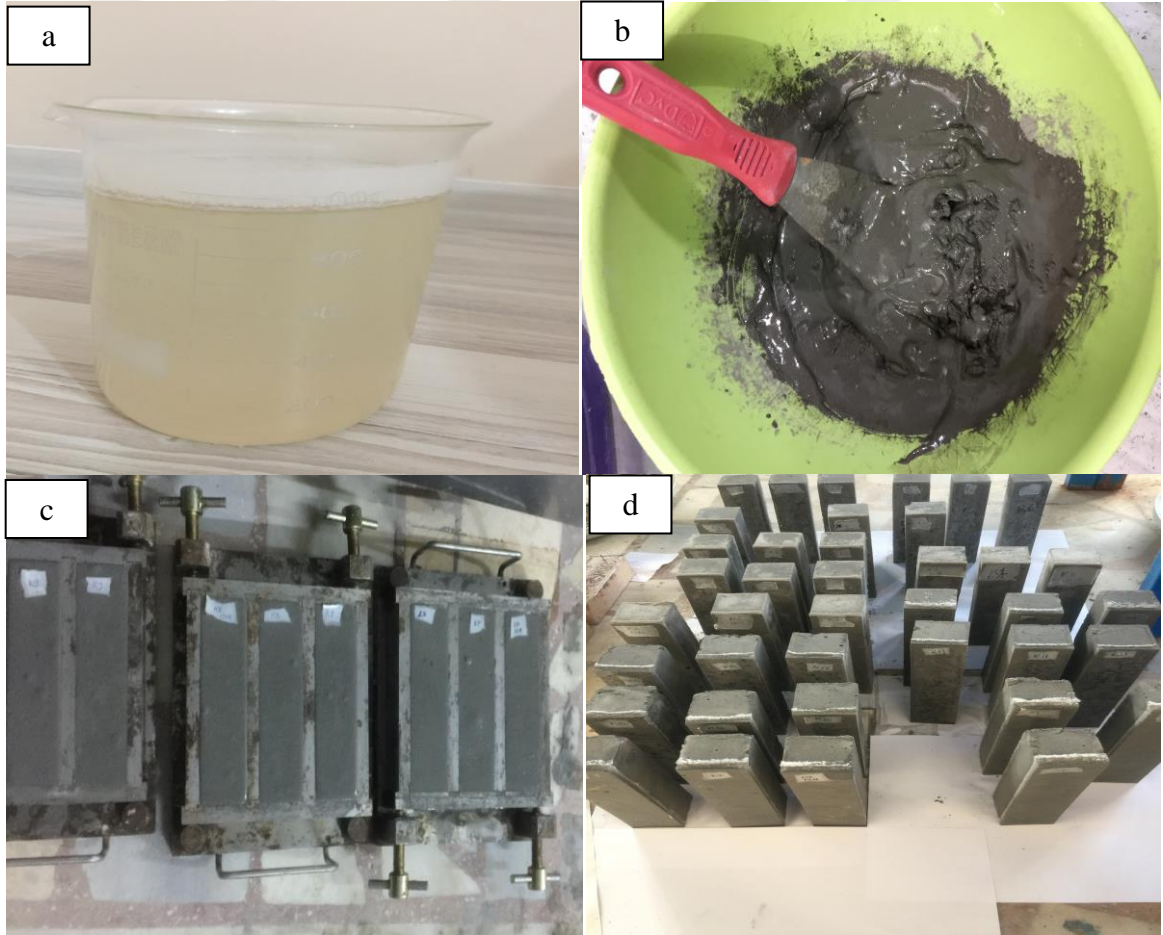
Tablo 3.5: Geopolimer harçların hacimce oranları ve ağırlıkça değerleri.

Karışım No	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ Ağ.(g.)	Su Ağ.(g.)	NaOH Ağ.(g.)	NaOH Der.(M)	SK hac.(%)	UK hac.(%)	Vermikülit hac.(%)
K1	180	180	90	10	50	50	0
K2	180	180	90	10	35	50	15
K3	180	180	90	10	20	50	30
K4	180	220	90	10	30	70	0
K5	180	220	90	10	15	70	15
K6	180	220	90	10	0	70	30
K7	180	130	90	15	50	50	0
K8	180	110	90	15	35	50	15
K9	180	110	90	15	20	50	30
K10	180	210	90	15	30	70	0
K11	180	210	90	15	15	70	15
K12	180	185	90	15	0	70	30

### 3.2.2. Geopolimer Harç Karışımlarının Hazırlanması

Deneysel işlem çalışması yapılırken literatür çalışmalarından da yararlanılarak farklı molar derişimlerinde NaOH ve farklı oranlarda su, UK, SK, vermikülit miktarı denenmiştir. Bunun için bir çok sayıda optimizasyon çalışması yapılmıştır. Karışım oranları belirlendikten sonra deney için kullanılan malzemelerin ve deney sonucu elde edilen karışımların ve numunelerin tartılmasında 1 gram hassasiyete sahip elektronik terazi kullanılmıştır. Bu karışımlar hazırlanırken uçucu külün alkali aktive edilmesi sağlanmıştır. Öncelikle sodyum hidroksitinin amaçlanan derişimlerde sulu çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözelti 1 gün bekletildikten sonra laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra bu çözelti, sodyum silikat ile birleştirilip UK aktive edilmiştir. Sodyum hidroksit derişimi 10M ve 15M olarak belirlenmiştir. Molar derişim hazırlanırken; mol ağırlığına tekabül eden NaOH miktarı tartılmıştır. Daha sonra 1000 ml hacminde cam beher yarısına (500 ml.) kadar şebeke suyu ilave edilmiştir. Su ilavesinden sonra tartılan NaOH suyun içerisine boşaltılıp ölçekli kabın 1000 ml. çizgisine kadar

olacak şekilde tekrar suyun ilavesi yapılmıştır. Suyun ilavesinden sonra metal bir kaşıkla sabit hızda 3 dakika boyunca elle karışımı sağlanmıştır. Elle karışım yapılmadan önce ağız maskesi ve kimyasallara karşı dayanıklı eldiven kullanılmıştır. Karıştırma işlemi esnasında ekzotermik reaksiyon olması sebebiyle ısı açığa çıkmıştır. Hazırlanan bu karışımdan 90 gram alınarak 180 gram  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile sabit hızda 3 dk. boyunca karışımı sağlanmıştır. Alınan alkali aktifleştirici karışım UK ile karıştırılmıştır. Daha sonra sırası ile silis kumu, vermikülit ve karışım suyu ilavesi yapıp 5 dk. boyunca karıştırılacak şekilde geopolimer harç elde edilmiştir (Şekil 3.6b). Hazırlanan harç karışımlarından  $4 \times 4 \times 16$  cm ebatlarında prizmatik çelik kalıpta numuneler üretilmiştir (Şekil 3.6c). Her bir karışımdan 3 tane olmak üzere toplam 36 adet örnek (Şekil 3.6d) elde edilmiştir (Kantarıcı, 2013; Görhan ve Kürklü, 2014; Arıöz, 2015; Mahmut, 2015; Girgin, 2016).



Şekil 3.6: a. NaOH'ın sulu çözeltisi, b. harç, c. harcın kalıplara yerleşimi, d. harç numuneleri.

### 3.3. Uygulanan Deneyler

#### 3.3.1. Yayılma Tablası (Akma) Deneyi

Hazırlanan geopolimer harç karışımlara standartlara uygun olarak yayılma tablası ölçümleri yapılmıştır (TS EN 1015-3, 2000). Deney sonuçları belirtilen karışım oranlarının her biri için yapılmıştır (Tablo 3.2). Şekil 3.7’de gösterilen üst iç çapı 70 mm, alt taban çapı 100 mm, yüksekliği 50 mm çapında ve çeperin et kalınlığı minimum 2 mm olan kalıbın her tarafı bir bezle temizlenip kurutulduktan sonra yağlanmıştır. Kalıp ortalanacak şekilde ayarlanması sağlanmıştır. Sistem ayrıca ayak, sert bir tabla kaidesi ve dairesel levhadan teşkil edilmiştir. Geopolimer harç karışımı kalıbın içine 2 katman şeklinde, dairesel kesitli, sert, su emmeyen, aşağı yukarı 40 mm çapında, yaklaşık 200 mm uzunlukta ve 250 g ağırlığındaki tokmakla onar kere vurularak sıkıştırma prosedürü gerçekleştirilmiştir. Kalıbın üzerinde fazla kalan harç sıyrılarak alınır. Ayrıca dairesel levha üzerine sıçrayan harç temizlenir. Sıkıştırma prosedürü yapılırken kalıbın merkezden kaymasını engellemek suretiyle önlem almak gerekmektedir. Daha sonra kalıp çıkarılmış ve 1,25 cm yükseklikten sabit sıklıkta her saniyede 15 kez olmak üzere düşüş gerçekleştirilmiştir. Akan geopolimer harcın çapı birbirine dik iki doğrultuda kumpasla ölçümü sağlanmış (Şekil 3.7) ve bu iki ölçümün aritmetik ortalaması alınarak ölçüm sonlandırılmıştır. Ortalama çap Eşitlik 1 yardımıyla bulunur (TS EN 1015-3, 2000).

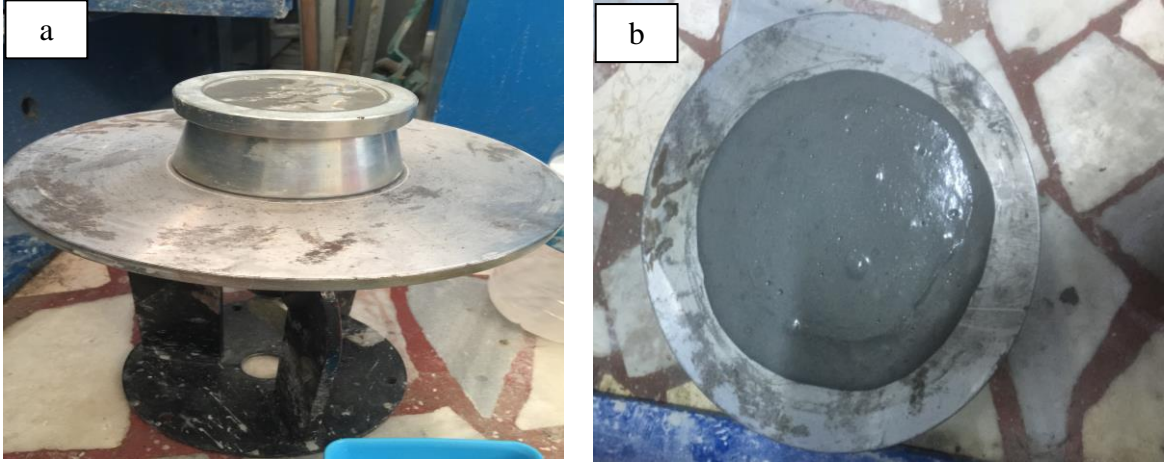
$$D_{ort}=(D_{ilk}+D_{son})/2 \quad (1)$$

Burada;

$D_{ort}$ = Ortalama çapı (Birbirine dik iki doğrultuda alınan ölçülerin ortalaması),

$D_{ilk}$ = 1.yönde ölçülen çapı,

$D_{son}$ = İlk yöne dik olacak şekilde ölçülen çapı ifade eder.

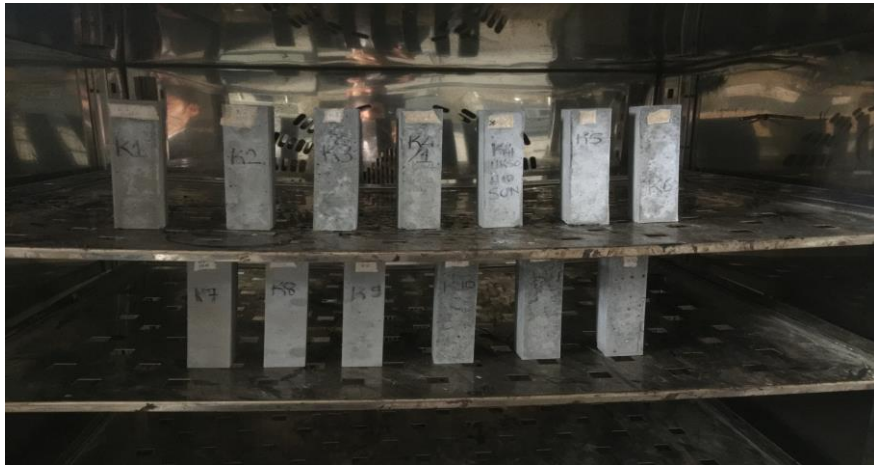


Şekil 3.7: a. Geopolimer harcın yayılmadan önceki durumu, b. geopolimer harcın yayılmadan sonraki durumu.

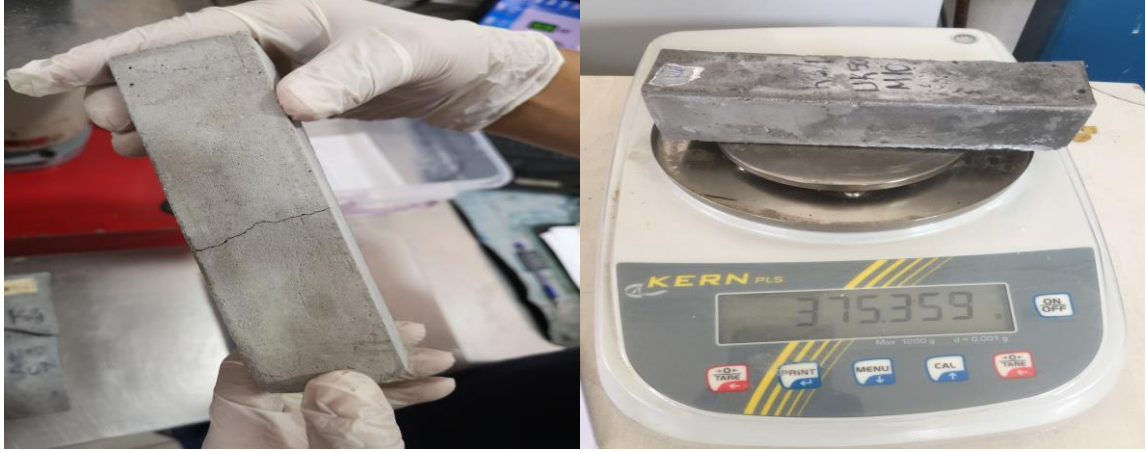
### 3.3.2. Su Emme Deneyi

Geopolimer harç karışımlarına ait numunelerin ağırlıkça su emme oranları, TS 12390-7’de ifade edildiği biçimde belirlenmiştir. Öncelikle numunelerin 15 litre kapasiteli 200 °C’ye kadar çalışabilir vaziyetteki Rantek Marka etüve konulup etüv kurusu haline gelmesi sağlanmıştır (Şekil 3.10). Daha sonra da kuru yüzey doymun hale getirilmiştir. Etüv kurusu ağırlık  $W_{ek}$  ve kuru yüzey doymun ağırlık  $W_{kyd}$  ağırlıkları tespit edildikten (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9) sonra Eşitlik 2’de gösterildiği üzere ağırlıkça su emme oranı ( $S_e$ ) hesaplanmıştır (TS 12390-7, 2010).

$$S_e = (W_{kyd} - W_{ek}) / W_{ek} \times 100(2)$$



Şekil 3.8: Geopolimer harç numunelerinin etüvde kurutulması.



Şekil 3.9: Geopolimer harç numunelerinin tartılması.

Eşitlik 2’de geçen ifadeler;

$S_e$ = Su emme değerini, (%)

$W_{kyd}$ = Kuru yüzey doygun ağırlığını, (g)

$W_{ek}$ = Etüv kurusu ağırlığını, (g) ifade etmektedir.

### 3.3.3. Taze Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Öncelikle 4×4×16 cm boyutlarına sahip üç gözlü çelik kalıpların boş ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra geopolimer harç numuneler düzgünce kalıplara yerleştirildikten sonra (Şekil 3.10) elektronik tartıda tartılmıştır. Harç dolu kalıpların dolu ağırlığı, boş olan kalıpların ağırlığından çıkarıldıktan sonra 3 gözlü kalıbın hacmine bölünmüştür. Elde edilen sonuçlar aynı zamanda aritmetik ortalaması olarak tespit edilmiştir. TS EN 12390-7 (2010)’a uygun ve Eşitlik 3’te gösterilen denkleme uyularak taze birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Harç dolu kalıpların ağırlığı Desis marka elektronik baskül ile tartılmıştır.





Şekil 3.10: Harç dolu kalıpların tartılması.

$$W_{tbha}=(W_{kalıp+harç}-W_{kalıp})/V \quad (3)$$

Burada;

$W_{tbha}$ =Taze birim hacim ağırlık, (g/cm<sup>3</sup>)

$W_{kalıp+harç}$ =Harç karışımı ile dolu üç gözlü kalıbın ağırlığı, (g)

$W_{kalıp}$ =Üç gözlü çelik kalıbın ağırlığı, (g)

$V$ =Üç gözlü kalıbın hacmi (cm<sup>3</sup>) ifade etmektedir.

### 3.3.4. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Üretilen 4×4×16 cm boyutlarına sahip geopolimer harç numunelerinin etüv kurusu ağırlığının tespiti için 24 saat süreyle 105 °C’de kurutulması sağlandıktan sonra 1 g hassasiyetli elektronik terazi vasıtasıyla ağırlıkları tespit edilerek ( $W_{ek}$ ) üretilen örneklerin hacmine ( $V$ ) bölünerek birim hacim ağırlıkları ( $W_{bha}$ ) elde edilmiştir. Her bir karışımdan 3 tane numune üretildiğinden tespit edilen birim hacim ağırlıkları her seri için toplanıp aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık sonuçlarının elde edilmesi TS EN 12390-7 (2010)’a göre tespit edilmiştir. Eşitlik 4’te gösterilen denkleme uyularak görünür birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır (TS EN 12390-7, 2010).

$$W_{kbha}=W_{ek}/V \quad (4)$$

Burada;

$W_{kba}$ =Kuru birim hacim ağırlık, (g/cm<sup>3</sup>)

$W_{ek}$ =Etüv kurusu ağırlık, (g)

$V$ =Numunenin hacmi, (cm<sup>3</sup>) olarak ifade edilmiştir.

### 3.3.5 Görünen Porozite Deneyi

Geopolimer harç numuneleri elde edildikten sonra TS EN 772-4 (2000)'e uygun şekilde görünen porozite deneyi yapılmıştır. Öncelikle numuneler suya doyurulup yüzeyi havlu ile kurutulup kuru yüzey doygun ağırlığı ( $W_{kyd}$ ) ölçülmüştür. Sonrasında Arşimet düzeneğindeki numune tel sepete konularak sudaki ağırlığı ( $W_{suda}$ ) ölçülmüştür. Daha sonra geopolimer harç numunelerinin etüv kurusu ağırlığının tespiti için 24 saat süreyle 105 °C'de kurutulması sağlandıktan sonra elektronik terazi vasıtasıyla ağırlıkları tespit edilerek ( $W_{ek}$ ) Eşitlik 5'te ifade edildiği gibi görünen porozite değerleri bulunmuştur. Örneklerin sudaki ağırlığı Şekil 3.11'de gösterilen 0,01 g hassasiyetli, Radwag PS 4500 R2 marka elektronik terazi ile ölçülmüştür.

$$\text{Görünen porozite (\%)} = (W_{kyd} - W_{ek}) / (W_{kyd} - W_{suda}) \times 100 \quad (5)$$

Burada;

$W_{kyd}$ = Kuru yüzey doygun ağırlık, (g)

$W_{ek}$ = Etüv kurusu ağırlık, (g)

$W_{suda}$ = Sudaki ağırlık, (g) olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.11: Numunelerin sudaki ağırlığının tespit edilmesi.

### 3.3.6 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi 4×4×16 cm boyutlarına sahip numunelerin TS EN 1015-11 (2000)'e sadık kalınarak çimento presinde basınç deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımı değeri Eşitlik 5 yardımıyla hesaplanmıştır. Her seriden 2 adet numune kullanılmıştır. Kullanılan numuneler (4×4×16 cm) eğilme deneyi cihazı ile ortadan ikiye ayrıldıktan sonra (Şekil 3.14a ve Şekil 3.14b) her seriden 2 adet olmak üzere toplamda 4 tane basınç deneyine hazır numune meydana getirmiştir. Bu 4 numunenin basınç testi yapılıp aritmetik ortalaması alınmıştır (Şekil 3.14c ve Şekil 3.14d)

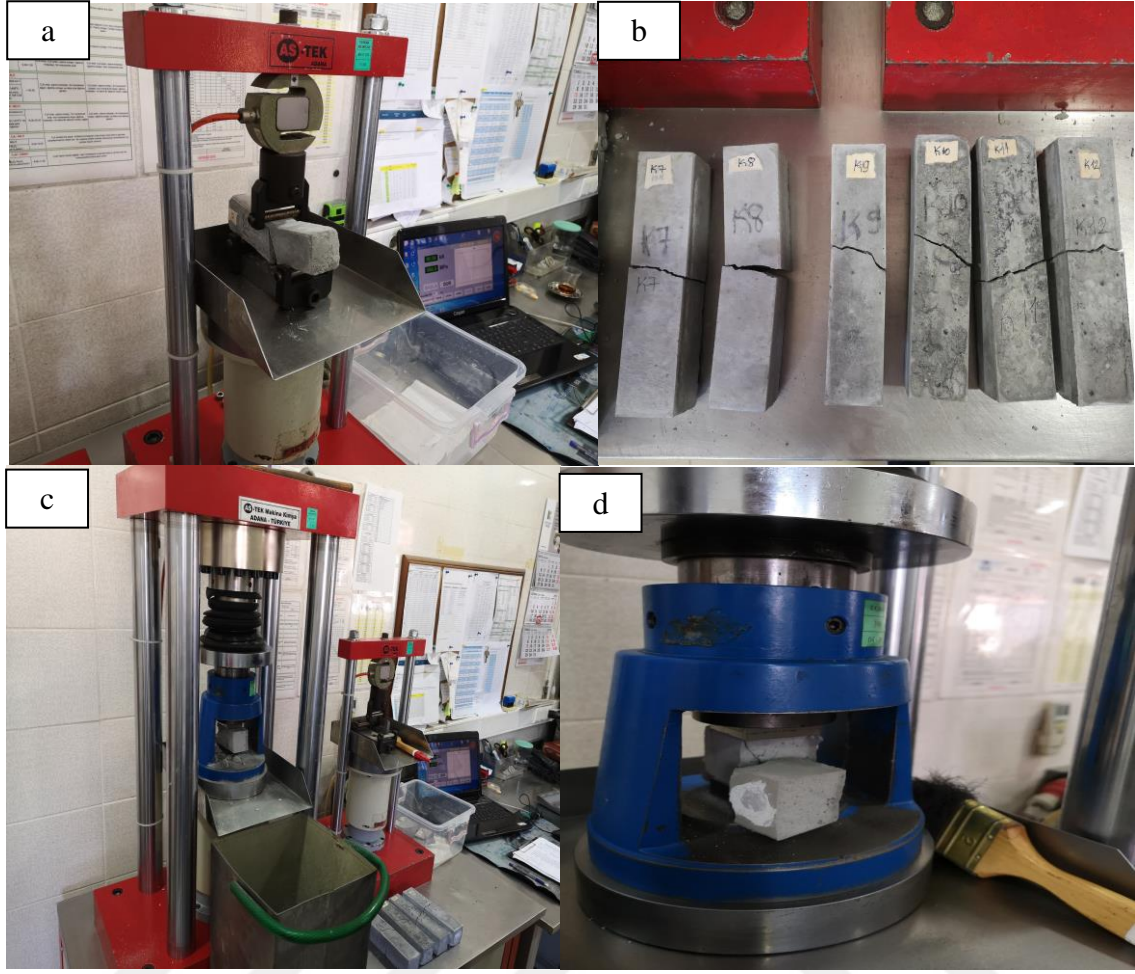
$$\sigma = P/A \quad (5)$$

Eşitliğe göre söz konusu simgelerin açıklaması;

$\sigma$ : Basınç dayanımı, (MPa)

P: Numuneye uygulanan yük, (Newton)

A: Numunenin basınç uygulama alanı, (mm<sup>2</sup>)



Şekil 3.12: a. Eğilme cihazı, b. numunelerin bölünmesi, c. basınç presi, d. basınç testi.

### 3.3.7 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Elde edilen numunelerin her birine iki yüzeye de uygulanmak üzere harç numunesinin bir ucundan öteki ucuna ses dalgalarının geçmesinin sağlanması ve hızının tespit edilmesi TS EN 12504-4, ASTM C 597 (2004)' e sadık kalınarak söz konusu test icra edilmiştir. İşlem yapılırken 0,1  $\mu$ s duyarlılığında ultrases cihazı ile geçen süre olan t değeri tespit edilmiştir. Kablo uçlarına bağlı olan silindirik transduserler numunenin boyu doğrultusunda iki uç noktanın yüzeyine tutulmak suretiyle doğrudan geçiş süresi olan t,  $\mu$ s sonuçları kayıt altına alınmıştır. Sonrasında transduserlerin yerleri değiştirilerek tekrar ölçüm yapıp bu iki okumanın aritmetik ortalaması alınarak ölçüm sonlandırılmıştır (Şekil 3.13). Kayıt altına alınan değerler Eşitlik 6 yardımıyla seslerin numunenin bir ucundan diğer ucuna geçiş süresini bulduktan sonra söz konusu geçiş hızı hesaplanmıştır. Söz konusu deney Proceq Pundit marka 20–500 kHz arası bant genişlikli cihaz ile yapılmıştır.

$$V_{ses} = L \times 1000 / t \quad (6)$$

Burada;

$V_{ses}$  = Ultrases geçiş hızı, (km/s)

L= Numunenin ölçüm yapılan bir ucundan diğeri ucuna olan iki yüzey arası mesafe, (m),

t= Numuneye ait ölçüm yapılmak suretiyle iki ucu arasından sesin geçişi sırasında geçen süreyi ( $\mu$ s) ifade etmektedir.

Tablo 3.6’da gösterildiği gibi ultrases geçiş hızına bağlı olarak harcın veya betonun kalitesi hakkında tahmin elde edilebilir.

Tablo 3.6: Beton kalitesinin tahmin edilmesi (TS EN12504-4, ASTM C 597, 2004).

Ses Hızı ( $V_{ses}$ ) km/s	Beton Kalitesi
>4,5	Mükemmel
3,5-4,5	İyi
3,0-3,5	Şüpheli
2,0-3,0	Zayıf
<2,0	Çok Zayıf



Şekil 3.13: Ultrases geçiş hızı deneyi.

### 3.3.8 Isıl İletkenlik Deneyi

Farklı karışım oranları için üretilen geopolimer harç numunelerinin bir anlamda ısı yalıtım özelliklerinin belirlenmesinde bir kıstas olan ısı iletkenlik değerleri tespit edilmiştir. Isıl iletkenlik deneyi yapılırken Gençel (2015)’in çalışmasında uygulamış olduğu metoda göre numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri tespit edilmiştir. Numunenin her birine üçer

kere ölçülerek bu ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.14). Söz konusu deney C-Therm marka, 50-200 derece arasında ölçüm kapasiteli, saniyede 0 W/mK'dan 500 W/mK'ya kadar test edebilir, kalibrasyonsuz ısı iletkenlik analiz cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 3.14: Isıl iletkenlik katsayısının tayini.

### 3.3.9 Geopolimer Harçların Mikroyapı Analizi (SEM)

Taneciklerin mikroyapı analizini gerçekleştirmek için TESCAN MAIA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 3.15a). Analizi yapılacak parça numuneler nemli olmayacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler silindirik bir mil üzerine yapıştırılmak suretiyle konulmuştur. Milin üzerinde sıra numaraları bulunmakta olup en fazla 7 adet numune yerleştirilebilir. Bu tez çalışmasında K1, K3, K10 ve K12 numunelerinin analizi amaçlanmıştır (Şekil 3.15b). Analizi yapılacak geopolimer harçlara ait parça numunelerin kaplaması yapılmıştır. İletkenliği sağlamak için yaklaşık 10 nm kalınlıklı altın-paladyum (%80-%20) karışımı kullanılmıştır. Kaplama işlemi, Laurell markalı, döndürerek kaplama özellikli cihazla yapılmıştır. Bu cihaz ayrıca dolmuş basıncı 230 bar (15 °C'de) olan, kokusuz, havadan ağır Argon gazı ile dolmuş yapılmış bir tüpe bağlıdır (Şekil 3.15c). Bu tüp ile vakumlama işlemi yapılmaktadır. Bu işlem bittikten sonra numunelerin iletkenliği için gümüş ile kaplanması sağlanarak SEM cihazına yerleştirilmiştir.



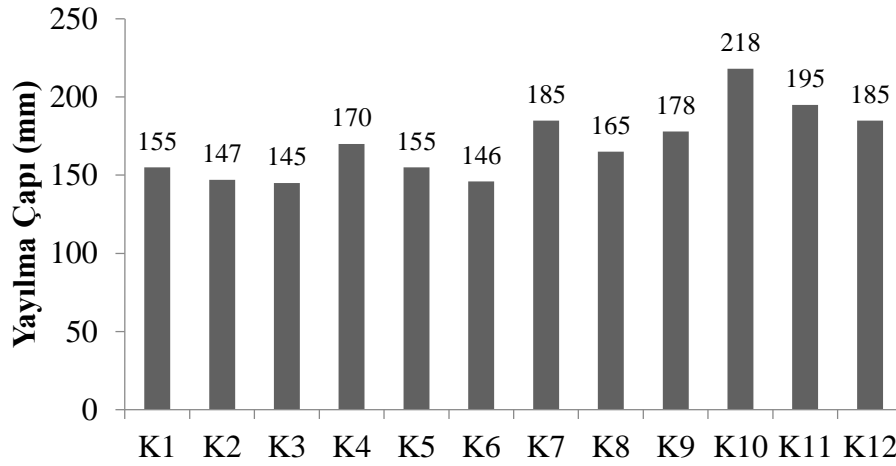
Şekil 3.15: a. Numunelerin mile yerleştirilmesi, b. kaplanması ve vakumlanması, c. analizi.

## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1 Yayılma Tablası (Akma) Deneyi Sonuçları

Tez kapsamında elde edilen farklı derişim ve uçucu kül oranına sahip harçların yayılma sonuçları Şekil4.1’de verilmiştir. Geopolimer harç karışımları hazırlanırken her karışım için ayrı bir karışım suyu miktarı belirlendi. Burada hazırlanan karışımlarda elde edilen kıvam değerleri 146 mm-217 mm arasında değişkenlik göstermiştir. Vermikülit oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. K1-K2-K3 aynı molar derişimli ancak farklı oranlarda vermikülit içeren numuneler incelendiğinde K1’in yayılma çapı değeri K3’ün yayılma çapı değerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, vermikülitin su emme eğiliminin yüksek olmasından kaynaklanır (Şahin, 2011).

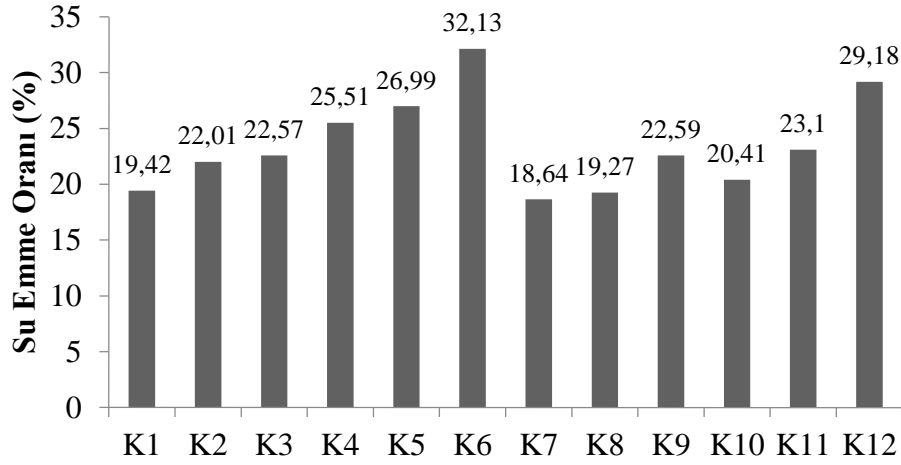


Şekil 4.1: Geopolimer harçların yayılma çapı değerleri.

#### 4.2 Su Emme Deneyi Sonuçları

Elde edilen geopolimer harç numuneleri üzerine su emme oranlarını bulmak için yapılan işlemler sonrasında elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir.





Şekil 4.2: Geopolimer harç numunelerinin su emme oranları.

En yüksek su emme oranı, hazırlanan karışımlardan K6'ya ait iken en düşük su emme oranı K7'ye aittir. K1 ve K7 kıyaslandığında iki karışımında UK ve silis kumu hacimce oranı eşit ve %50 iken su emme oranları da düşük olduğu görülmüştür. Bu beklenen bir durumdur çünkü iki karışımında da vermikülit içermemekle beraber su emmeyen camısı nitelikli UK ve silis kumu içermektedir (Türker vd., 2009).

K6 ve K12 mukayese edildiğinde ise iki karışım da eşit oranda UK ve SK sahipken su emme oranlarının en yüksek olduğu karışımlar olduğu görülmüştür. İki karışımında vermikülit oranı diğer karışımların içeriğindeki vermikülit oranından yüksek olduğundan su emme oranlarının yüksek olması ile açıklanabilir. Çünkü vermikülitin su emme kapasitesi yüksektir. Ayrıca K1-K2-K3, K4-K5-K6, K7-K8-K9, K10-K11-K12 karışımlarına sırasıyla bakıldığında vermikülit oranı arttıkça su emme oranlarının da arttığı görülmektedir.Şahin, (2011)'in yapmış olduğu çalışma sonucu elde ettiği bulgulara göre, karışımda yer alan vermikülit oranı arttıkça su emme kapasitesinin arttığı görülmüştür.

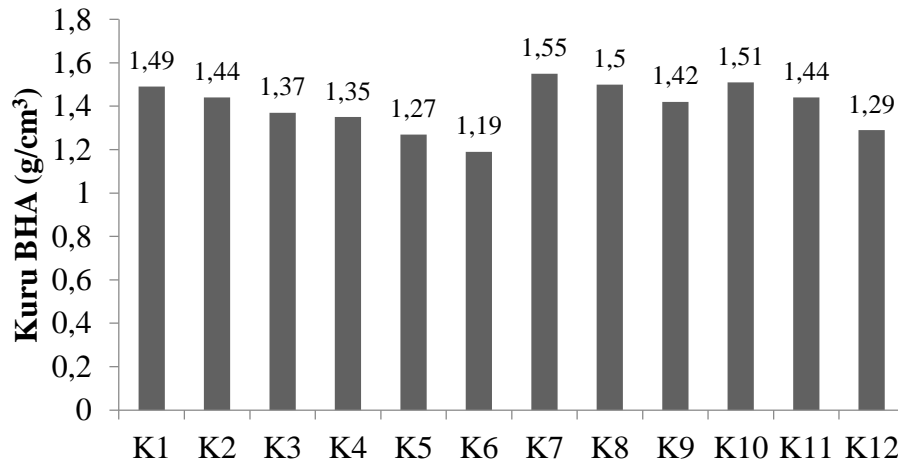
Ayrıca aynı UK, silis kumu vermikülit oranlarına sahip farklı derişimli karışımlara bakıldığında molar derişim arttıkça su emme oranlarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Örneğin K1 ile K7 aynı karışım oranlarına ve farklı derişim değerlerine sahip iki geopolimer numune örneklerine bakıldığında 10 M derişimli K1'in su emme değeri 15 Molar derişimli K7'nin su emme değerinden büyük olduğu

görülmüştür. Molarite arttığında mevcut silisyum ve alüminyum minerallerinin çözünmesi daha fazla olmakta, tepkimeye girmeyen uçucu küllerin azalması ile homojen yapı artmakta, boşluklu yapıdan uzaklaşmaktadır (Somna, 2011; Aydın, 2017; Pehlivanlı, 2017).

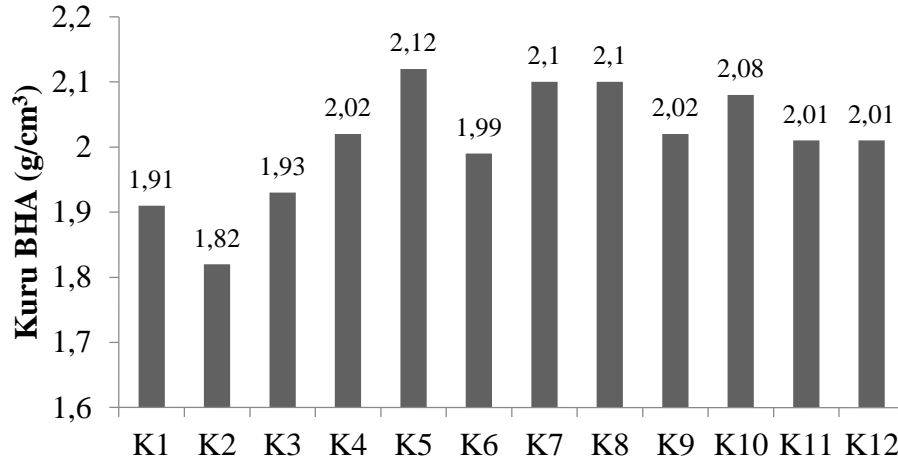
Betonun su emme eğilimi betonda mevcut olan gözeneklerin total hacmi ile alakalıdır. Bu total hacim ise beton üretiminde hesaplarındaki su/çimento oranına, agrega cinsine, bakım zamanı ve şartlarına, beton numunelerinin boyutuna bağlıdır. Ayrıca betonun su emme niteliği betonun dayanıklılığını da etkiler. Örneğin boşluklarda mevcut olan suyun donması gerilmelere yol açacaktır. Buzun tekrar erimesi de homojenliği etkileyecektir (Erdoğan, 2013).

#### 4.3 Birim Hacim Ağırlık (BHA) Deneyi Sonuçları

Deney sonuçlarına bakıldığında 10 M derişiminde hazırlanan harç numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri 15 M derişiminde hazırlanan harç numunelerinin birim hacim ağırlık değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle molarite arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinde artış olduğu görülmüştür. En yüksek kuru BHA değeri 15 M derişimli,  $1,55 \text{ g/cm}^3$  ile K7 karışımında elde edilirken, en düşük birim ağırlık değeri 10 M derişimli  $1,19 \text{ g/cm}^3$  ile K6 karışımında elde edilmiştir.



Şekil 4.3: Kuru BHA değerleri.



Şekil 4.4: Taze BHA değerleri.

Molarite arttığında geopolimerin yapısı boşluklu yapıdan uzaklaşmakta, çözünen Si iyonları daha fazla çözünmekte, aradaki bağlar daha sıkı olmaktadır (Somna, 2011). Çözülme değerinin NaOH derişimine ve çözülme süresi ile alakalı olduğu ifade edilmiştir. Rattanasak ve Chindaprasirt (2009)'un yapmış olduğu çalışma sonucu elde ettiği bulgulara göre çözünen iyon miktarının (Si ve Al) hazırlanan NaOH'ın molaritesi ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Kuru BHA ile taze BHA sonuçları mukayese edildiğinde; taze BHA değerleri kuru BHA değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bu, beklenen bir durumdur. Çünkü taze halde boşluklarda mevcut bulunan su etüv sonrası buharlaştığından değerlerde düşme meydana getirmiştir. Ayrıca taze birim hacim ağırlık değerlerine bakıldığında; molarite arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinde de artış olduğu görülmüştür. Molarite arttığında mevcut silisyum ve alüminyum minerallerinin çözünmesi daha fazla olmakta, tepkimeye girmeyen uçucu küllerin azalması ile homojen yapı artmakta, boşluklu yapıdan uzaklaşmaktadır (Somna, 2011; Aydın, 2017; Pehlivanlı, 2017).

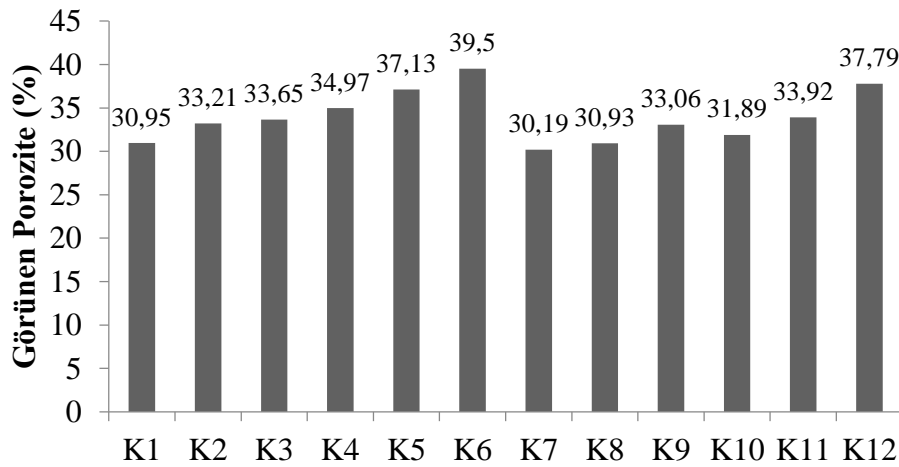
Ayrıca vermikülit oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Aynı molariteli ancak farklı vermikülit oranlı K1 ve K2 numunelerine bakıldığında K1'in BHA değeri K2'nin BHA değerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Şahin (2011)'in yapmış olduğu çalışmaya göre vermikülit oranı arttıkça numunede

meydana gelecek boşluk miktarından kaynaklı birim hacim ağırlık değerinde de azalma meydana geldiği görülmüştür.

UK miktarı arttıkça kuru BHA değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Örneğin K1-K4, K2-K5, K3-K6 numune çiftlerine bakıldığında K1, K2 ve K3 numunelerinde UK oranı %50 olduğundan BHA değerleri de daha yüksek olmuştur. Bunun sebebi; UK arttığında ortamda bulunan silisyum arttığından tepkimeye girmeyen UK miktarında artış olduğundan, geopolimer reaksiyon hızı azalır ve malzeme homojenlikten uzaklaşır (Duxon vd., 2007b).

#### 4.4 Görünen Porozite Deneyi Sonuçları

Hazırlanan geopolimer harç numuneleri 28 gün kalıpta bekletildikten sonra görünen porozite testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te belirtilmiştir.



Şekil 4.5: Görünen porozite değerleri.

Elde edilen değerlere bakıldığında vermikülit oranı arttıkça porozite değerlerinde artış olmuştur. Örneğin sırasıyla %0, %15, %30 vermikülit içeren K1,K2,K3 numunelerine bakıldığında elde edilen porozite değerleri sırasıyla %30,95, %33,21, %33,65 olarak elde edilmiştir. Aynı durum K7-K8-K9 numunelerinde de geçerlidir. Bu, beklenen bir durumdur. Çünkü vermikülitin su emme kapasitesinin fazladır.Şahin (2011)'in yapmış

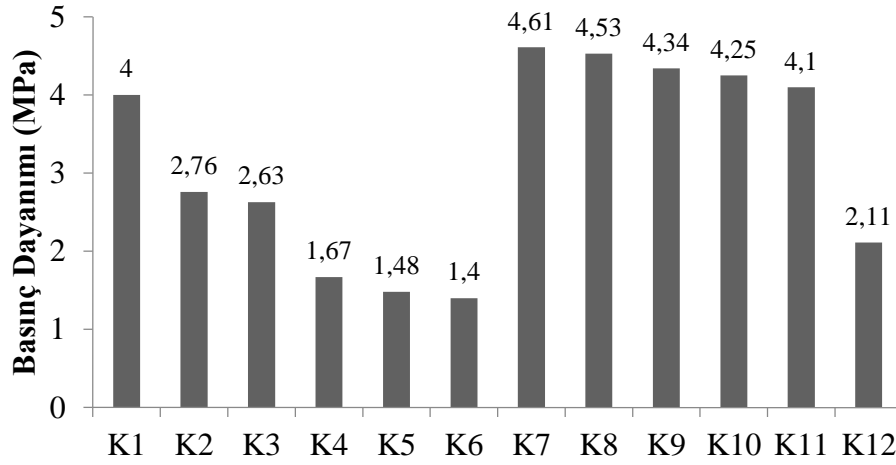
olduğu çalışmaya göre, vermikülit oranı arttıkça numunede meydana gelecek boşluk miktarında artış olduğu görülmüştür.

Molarite arttıkça porozite değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. K1 ve K7 numunesine bakıldığında tüm hammadde oranları eşit ancak molarite değerleri farklıdır. K1'in porozite değeri %30,95 iken K7'nin porozite değeri %30,19 olarak elde edilmiştir. K1'in derişimi daha az olduğundan porozite değeri daha fazla olmuştur. Molarite arttığında elde edilen ürün daha homojen bir yapıya bürünmektedir. Çünkü çözünen Si iyonları daha fazla olmakta, aradaki bağlar daha sıkı olmaktadır (Somna, 2011). Ayrıca geopolimer reaksiyonların çözülme süreci derişimle yakından ilgilidir (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

Geopolimer harç numunesi elde edilirken ilave edilen UK miktarı arttıkça tepkimeye girmeyen UK taneleri artacağından porozite değerlerinde de artış söz konusu olacaktır (Duxon vd., 2007b). Örneğin aynı molariteli ve vermikülit oranlı K1 ve K4 numunelerine bakıldığında K1'in UK oranı %50 ve porozite değeri %30,95 iken, K4'ün UK oranı %70 ve porozite değeri de %34,97'dir.

#### **4.5 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları**

Hazırlanan geopolimer harç karışımları 28 gün kalıpta bekletilip kalıptan alındıktan sonra basınç testine tabi tutulmuştur. UK arttıkça basınç dayanımı değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. UK arttığında geopolimerizasyon sırasında tepkimeye girmeyen UK miktarında artış olduğundan üretilen numunenin yapısı homojenlikten uzaklaşır (Duxon vd., 2007b). Örneğin UK içeriği % 50 olan K1 numunesinin basınç dayanımı 4,0 MPa iken UK içeriği % 70 olan K4 numunesinin basınç dayanımı 1,67 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 4.6'ya bakıldığında en yüksek basınç dayanımı değeri K3 numunesinde gözlenmiştir. En düşük basınç dayanımı değeri ise K7 numunesinde tespit edilmiştir.



Şekil 4.6: Basınç dayanımı değerleri.

Üretilen geopolimer beton veya harçların derişim değeri arttıkça mevcut silisyum ve alüminyumun yüksek derişimlerde çözünmesinden ötürü üretilen numunelerin basınç dayanımı da artış göstermektedir. OH<sup>-</sup> derişimi yüksek olduğunda, UK'nın çözünme hızı artmakta ancak gereğinden fazla OH<sup>-</sup> değeri ilk yaşlarda düşük değerli basınç dayanımına sebebiyet veren alümina silikat jelin çökelek meydana getirmesine sebep olmaktadır (Somna vd.,2011). Örneğin, uçucu kül, vermikülit ve silis kumu açısından aynı karışım hacmine sahip ancak farklı molar derişimli K1 ve K7 numunesine bakıldığında K7 karışımının basınç dayanımı değeri 4,61 MPa iken K1 karışımının basınç dayanımı değeri ise 4,0 MPa değerine sahiptir. Sonuç olarak alkali derişim değeri arttıkça tepkimeye katılmayan uçucu kül miktarının azalması ile geopolimer jel yapının daha homojen bir yapıya büründüğü ifade dileyebilir. Hazırlanan NaOH derişimi, geopolimer reaksiyonlarının istikametine dolayısıyla da basınç dayanımında etkin rol oynamaktadır (Panias vd., 2007). Ayrıca UK sodyum hidroksit ile iletişim haline geçtiğinde Al ve Si gibi iyonlar çözülür. Bu çözünen iyonların derişimi hazırlanan NaOH'ın derişimi ile yakından ilişkilidir (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009).

Vermikülit arttıkça vermikülitin boşluklu yapısından ötürü basınç dayanımı azalır (Şahin, 2011). Örneğin K1, K2, K3 numunelerinin vermikülit oranı sırasıyla %0, %15, %30 iken basınç dayanımı da sırasıyla 4,0 MPa, 2,76 MPa, 2,63 MPa'dır. Aynı durum K4-K5-K6 numuneleri için de geçerlidir.

Ayrıca kuru birim hacim ağırlık arttığında basınç dayanımında da artış olduğu görülmüştür. Ayrıca su emme oranı arttıkça basınç dayanımı da azalmıştır. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü su emme oranı numunenin boşluk oranı ile orantılı olduğundan boşluk oranı arttıkça da basınç dayanımında düşme olması beklenen bir durumdur (Erdoğan, 2013).

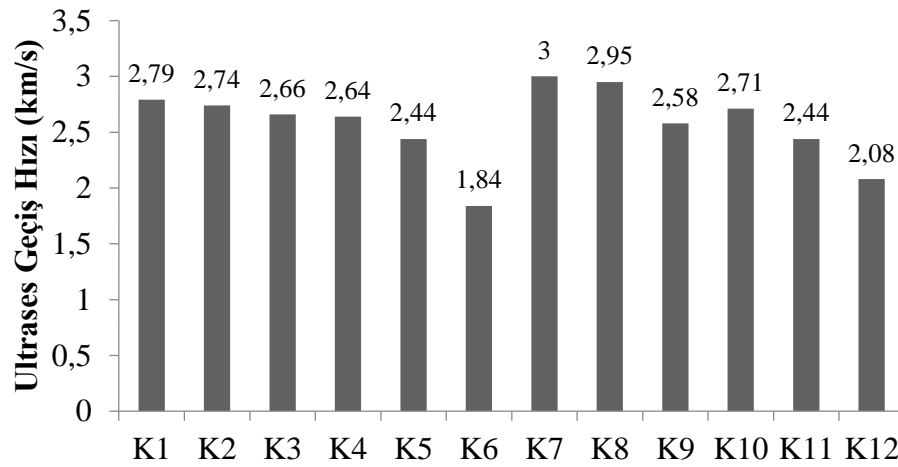
#### 4.6 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

Ultrases geçiş hızı deneyi sonucu elde edilen verilere bakıldığında elde edilen değerlerin 1,84 km/s ile 3,0 km/s arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerlere göre beton kalitesinin zayıf ve çok zayıf arasında değiştiği söylenebilir (Tablo 3.3). Çünkü ses geçiş hızı azaldıkça, numune boşluklu yapıya yaklaşır. Genel olarak molarite arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Örneğin K1 ve K7 numunelerine bakıldığında, 15 M derişimli K7 numunesinin ultrases geçiş hızı 3,0 km/s iken 10 M derişimli K1 numunesinin ultrases geçiş hızı 2,79 km/s olduğu görülmüştür. Ayrıca basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı değerleri arasında bir ilişki olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde de artış olduğu görülmüştür. Örneğin 3,59 MPa basınç dayanımlı K2 numunesinin ultrases geçiş hızı değeri 2,74 km/s iken 2,17 MPa basınç dayanımlı K4 numunesinin ultrases geçiş hızı değeri 2,64 km/s olduğu görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlık değeri arttıkça malzeme boşluklu yapıdan uzaklaşacağından ultrases geçiş hızı değerlerinde artış olduğu görülmüştür. UK oranı arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Örneğin %50 ve %70 UK içerikli K1-K4, K2-K5, K3-K6 numune çiftlerine bakıldığında %50 UK içerikli numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla 2,79-2,74-2,66 km/s iken %70 UK içerikli numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla 2,64-2,44-1,84 km/s olduğu görülmüştür.

Mahmut (2015)'in yapmış olduğu çalışmada elde ettiği bulgulara göre, molarite arttıkça ultrases geçiş hızında artma meydana geldiği görülmüştür. Ultrases geçiş hızı 1,78 km/s-1,81 km/s arasında değişim göstermiştir. Bunun sebebi, molarite arttıkça numunelerdeki boşluk yüzdesinde azalma meydana gelmesi olarak yorumlanabilir.

Binici vd. (2012), silis kumu ve uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer esaslı numuneler üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı deneyinde elde edilen bulgulara göre su

emme oranı fazla olan numunelerde ultrases geçiş hızı daha düşük bulunmuştur. Ayrıca ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasında dolaylı bir alaka olduğu, boşluksuz numunelerde basınç dayanımının daha yüksek olduğu, aynı şekilde ultrases geçiş hızı da daha yüksek değerlerde seyrettiği görülmüştür. Ultrases geçiş hızı 1,08 km/s-2,45 km/s arasında değişim göstermiştir. Diğer yandan geopolimerin yoğunluğu ve P dalgasının hızı arasında belirli bir bağıın mevcut olduğu, daha fazla boşluk içeren yoğunluğu daha düşük olan geopolimer numunelerde ultrases geçiş hızının daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7: Ultrases geçiş hızı değerleri.

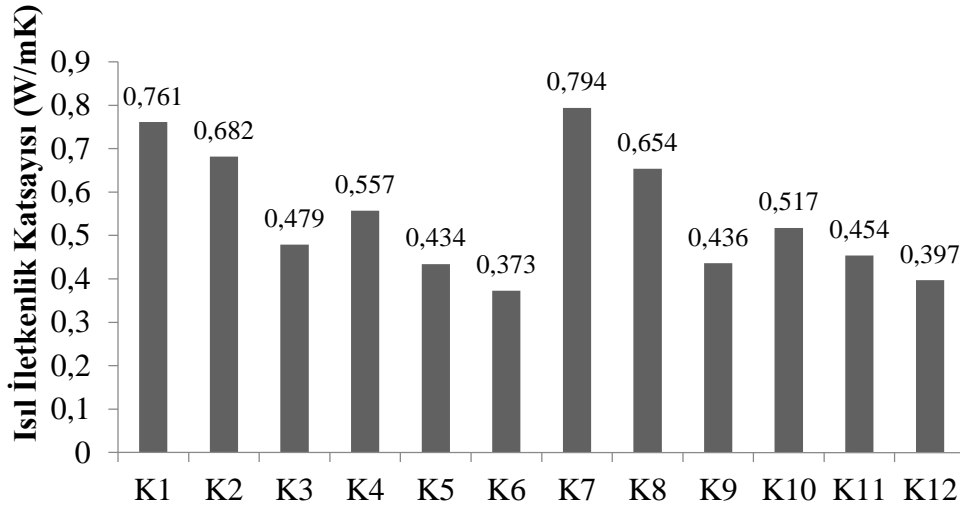
#### 4.7 Isıl İletkenlik Deneyi Sonuçları

Üretilen geopolimer harç numunelerinden elde edilen ısı iletkenlik sonuçlarının benzer yapı malzemeleriyle mukayese yapmak amacıyla TS 825'ten yararlanılmıştır.

Tablo 4.1: Birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri (TS 825, 1998).

Malzeme veya bileşenin türü	Birim hacim kütlesi (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl İlet. ( $\lambda$ ); (W/mK)
Pomza blok	500-800	0,20-0,39
Gaz beton bloklar	400-800	0,20-0,29
TS 704, 705 tuğlalar	1200-2000	0,50-0,96
Yatay delikli tuğlalar	$\leq 1000$	0,45
Normal beton (donatılı)	2400	2,10
Donatısız beton	2200	1,74





Şekil 4.8: Geopolimer harç numunelerinin ısı iletkenlik değ erleri.

Üretilen geopolimer harç numunelerinin ısı iletkenlik katsayılarına bakıldığında Tablo 4.1’de belirtilen sınırlara aykırı olmadığı görülmüştür. Numunelerin ısı iletkenlik katsayıları incelendiğinde, vermikülit oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı değ erlerinde düş me meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebi vermikülitin boşluklu ve birim hacim ağırlık değ erinin düşük olması, hafif olması, ısı yalıtım özelliğ inin yüksek olmasıdır. Söz konusu değ erlerin 0,373-0,794 W/mK arasında değ iş miştir. En yüksek ısı iletkenlik katsayısı değ eri %50 uçucu kül katkılı ve vermikülit iç ermeyen K7 numunesinde 0,794 (W/mK) olarak gözlenirken en düşük değ er K6 numunesinde 0,373 W/mK olarak tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık değ eri arttıkça boşluk oranı azaldığından ısı iletkenlik katsayısı değ erinde de artış olmuştur (Erdoğan, 2013; Toksoy, 1997).

UK arttıkça ısı iletkenlik katsayısı değ erlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Örneğ in K7 numunesinin ısı iletkenlik katsayısı değ eri 0,794 W/mK iken UK oranı daha yüksek olan K10 numunesinde bu değ er 0,517 W/mK olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi UK arttıkça bünyede bulunan boşluk oranı arttığından ısı iletkenlik katsayısı da azalır (Duxon vd., 2007b).

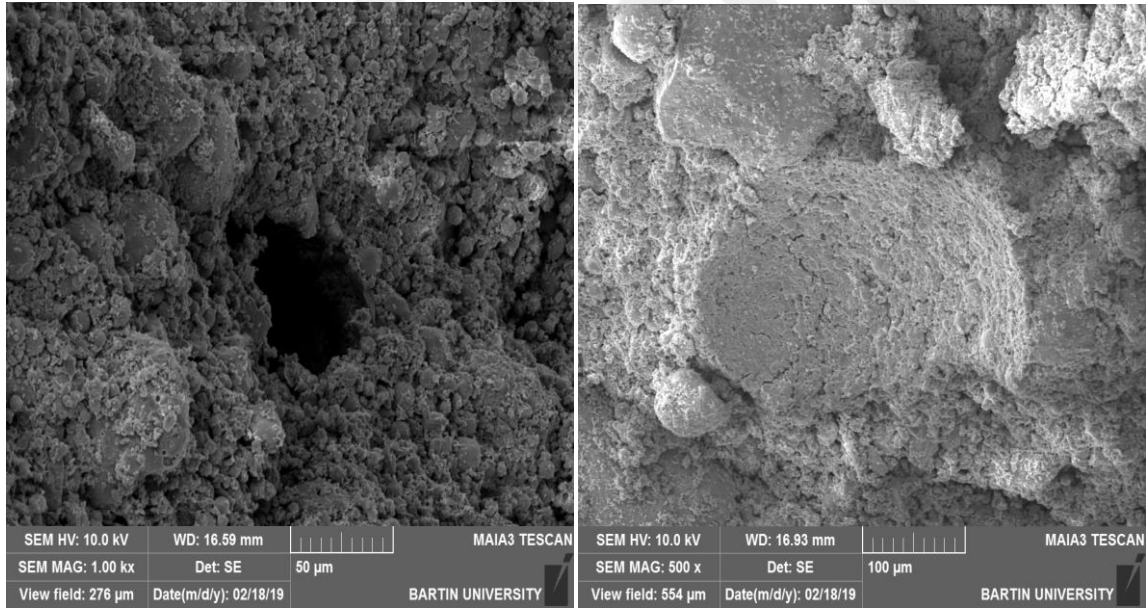
Aynı uçucu kül oranına sahip farklı vermikülit iç erikli K1 ve K2 numunesine bakıldığında K2’nin ısı iletkenlik değ erinin daha düşük olduğu görülmektedir. Geopolimer esaslı malzemelerin bünyesinde N-A-S-H jellerinde su mevcut değ ildir. Numune eldesinde işlenebilirlik amacıyla kullanılan su, belirli bir süre sonra karışımı terk ettiğ inden sürekli

olmayan ufak boşluklar meydana getirmektedir. Bunun sonucunda geopolimer esaslı malzeme hafif, ısı yalıtım özelliği yüksek bir ürün olarak elde edilebilmektedir (Rangan, 2008).

Elden (2011)'in elde ettiği bulgulara göre, betonun birim ağırlığı azaldıkça ısı yalıtım özelliklerinde iyileşme olduğu, ısıl iletkenlik katsayısı ile birim ağırlık değerleri arasında sıkı bir ilgi olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca agrega türünün de önemli bir kıstas olduğu ifade edilmiştir. Hafif agregalı beton kullanıldığından ısıl iletkenlik katsayısı değerlerinde de azalma olduğu görülmüştür.

#### 4.8 Mikroyapı Analizi (SEM) Deneyi Sonuçları

10 M ve 15 M olarak hazırlanmış olan numunelerin laboratuvar ortamında 28 gün bekletildikten sonra alınan örneklerin mikroyapı analizleri (SEM) yapılmıştır. Bu örnekler, 10 M derişimli K1-K3, 15 M derişimli K10 ve K12 numuneleridir.

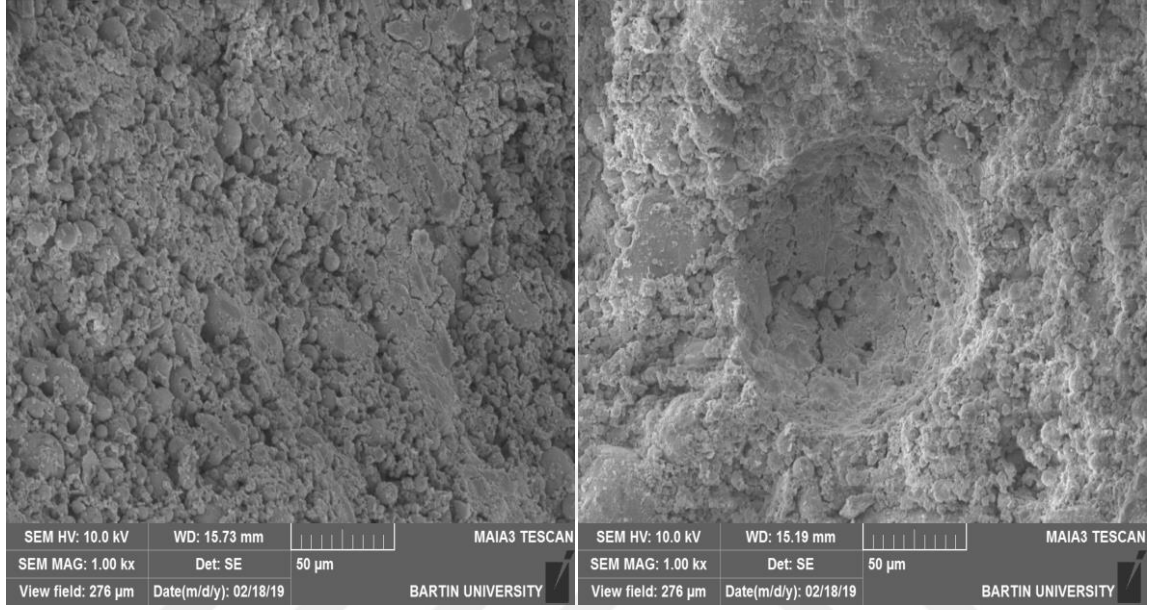


a) Gözenek oluşumu. b) Yarı küresel çukur ve çatlak oluşumu.

Şekil 4.9: K1 numunesinin SEM görüntüsü.

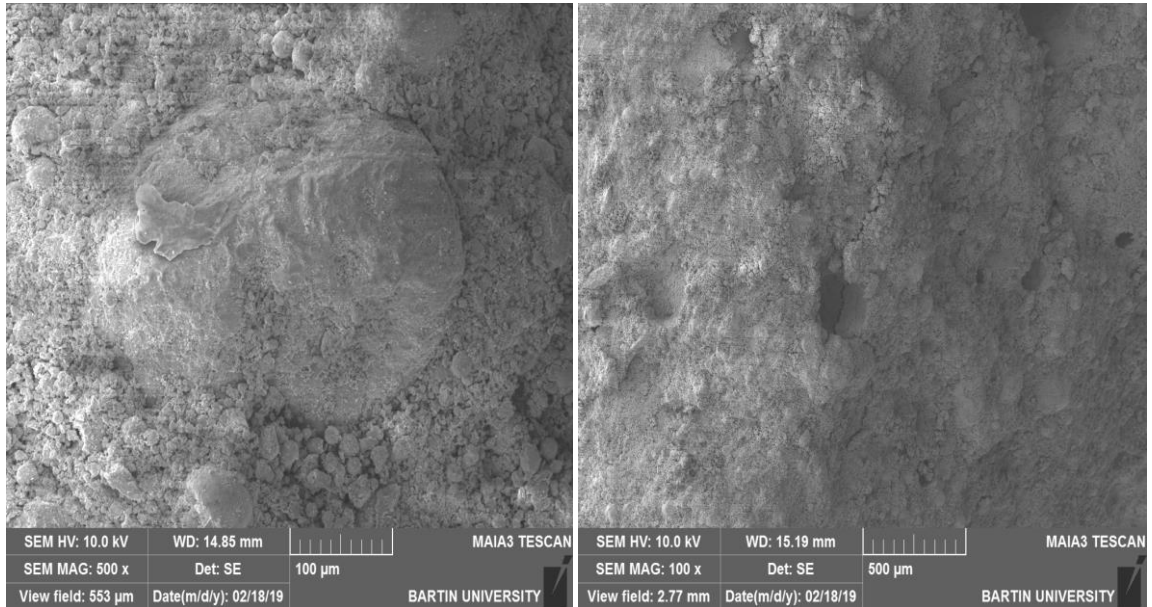
28 gün süre ile laboratuvar ortamında havada kür edilen K1 karışimli numunenin yüzeyinde gözeneklerin oluştuğu ve çukurların oluştuğu görülmüştür. Gözeneklerin, buharlaşan suyun ortamdan ayrılması neticesinde meydana geldiği düşünülmektedir.

Numunede ayrıca çatlak oluşumunun meydana geldiği görülmüştür. Bu çatlakların meydana gelmesinin sebebi, basınç dayanımı deneyi sırasında, örneğin sıkışması neticesinde ya da deney için parça alınması sırasında meydana geldiği tahmin edilmektedir. Örnekte ayrıca tepkimeye katılmayan UK tanelerinin meydana geldiği görülmüştür (Arıöz, 2015).



a) Jel oluşumu.

b) Çukur ve çatlak oluşumu.

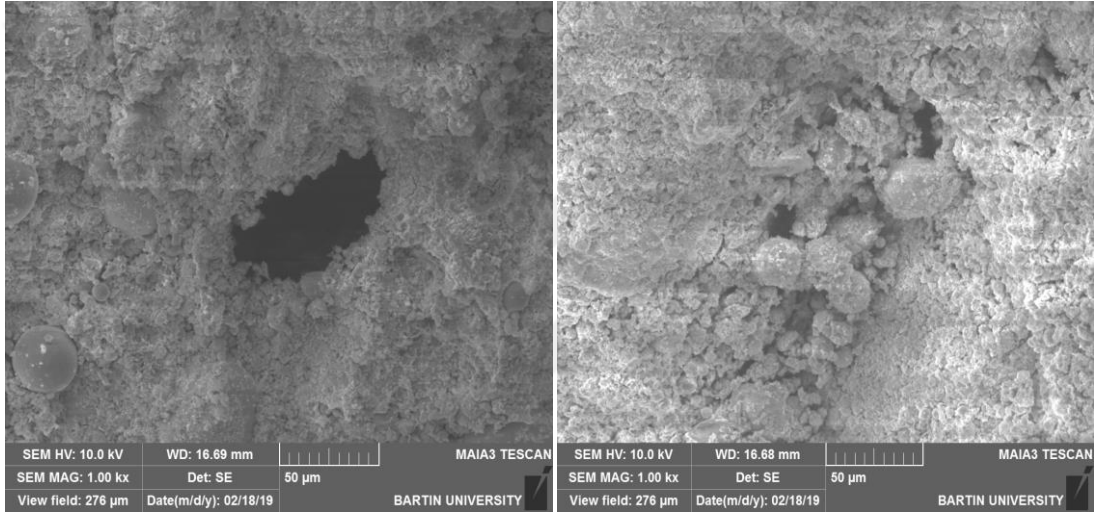


c) UK taneleri.

d) Gözenek oluşumu.

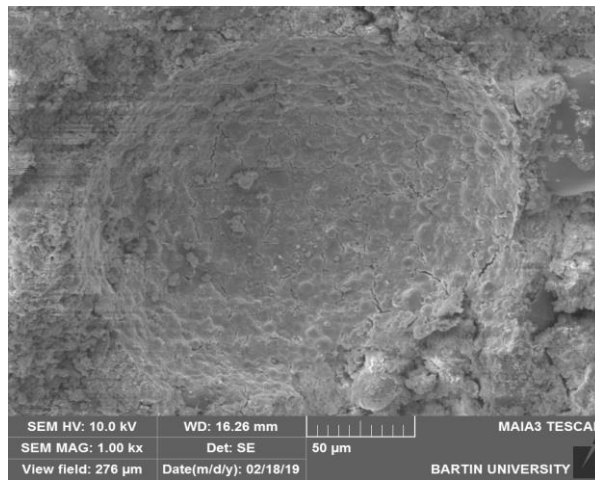
Şekil 4.10: K3 numunesinin SEM görüntüsü.

Numunenin yapısına bakıldığında, numune içerisinde tepkimeye girmeyen irili ufaklı UK tanelerinin arta kaldığı görülmüştür. Numunenin yüzeyinde çukur, gözenek ve çatlakların oluştuğu görülmüştür. Numunede jel oluşumunun gözlemlendiği, çukurların meydana geldiği, ayrıca küçük çaplı gözeneklerin ve mikro çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Çukurların buharlaşan sudan kaynaklı olabileceği, kalıntıların tepkimeye girmeyen ürünlerden meydana geldiği, gözeneklerin vibrasyon eksikliği, hava boşluğundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Çatlakların basınç dayanımı esnasındaki sıkışmadan veya buharlaşan sudan ötürü büzülme sonucu oluşabileceği, yarı küresel küçük çaplı boşlukların da kopan parçalardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir.



a) UK taneleri, gözenek oluşumu.

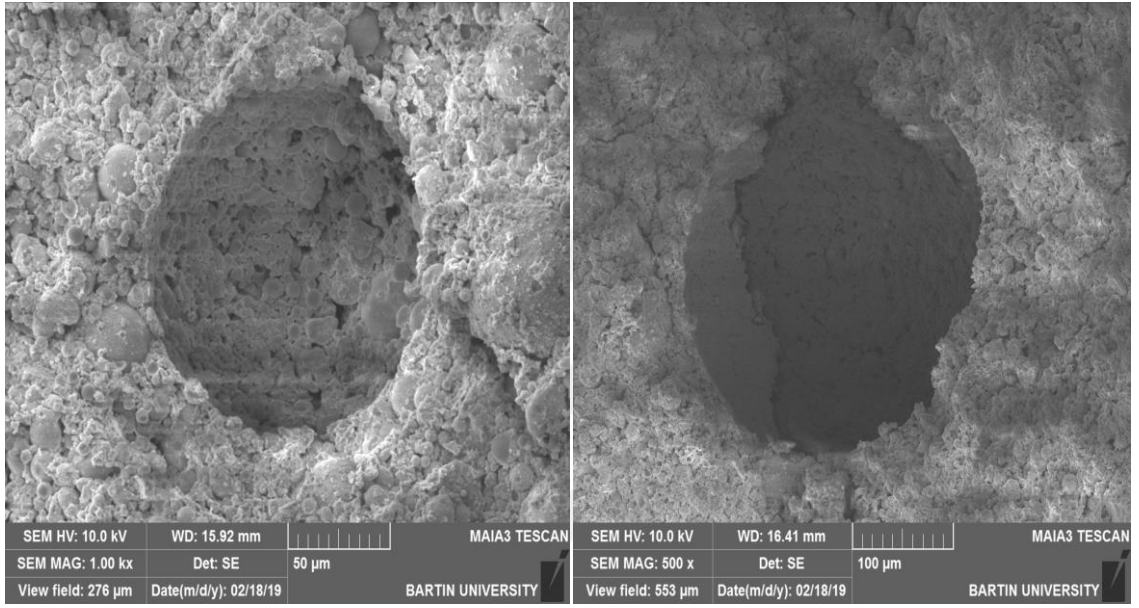
b) Jel oluşumu.



c) Çukur ve çatlak oluşumu.

Şekil 4.11: K10 numunesinin SEM görüntüsü.

15 M derişime sahip K10 numunesinin yüzey morfolojisi incelendiğinde reaksiyona girmemiş küresel yapıda çok sayıda uçucu kül taneleri ve gözenekler görülmüştür (Jimenez ve Palomo, 2005). Ayrıca jel fazın belirli bir alanda meydana gelerek UK tanelerinin etrafını sardığı fakat numunenin öteki bölümünde jel fazın net olarak oluşmadığı görülmüştür. Jel fazın meydana gelmediği alanda tepkimeye katılmayan UK taneleri dikkat çekmektedir. Numuneye yakinen bakıldığında çatlakların oluştuğu görülmüştür (Arıöz, 2015; Bakharev, 2005; Sidhunata vd., 2006).



a) UK taneleri, çukur ve jel oluşumu

b) Çatlak oluşumu.

Şekil 4.12: K12 numunesinin SEM görüntüsü.

15 M derişime sahip K12 numunesinin yüzey morfolojisi incelendiğinde reaksiyona girmemiş küresel yapıda çok sayıda uçucu kül taneleri ve gözenekler görülmüştür. Öteki yandan jel oluşumunun meydana geldiği gözlenmiştir (Jimenez ve Palomo, 2005).

Ayrıca jel fazın belli bir bölgede oluşarak UK tanelerinin etrafını sardığı fakat numunenin öteki kısmında jel fazın net bir şekilde oluşmadığı görülmüştür. Jel fazın meydana gelmediği alanda tepkimeye katılmayan UK taneleri dikkat çekmektedir. Numuneye yakinen bakıldığında çatlakların oluştuğu görülmüştür (Arıöz, 2015).

Chindaprasirt vd. (2009)'un elde etmiş olduğu bulgulara göre; UK'lı geopolimerlerin SEM analizine bakıldığında kısmen tepkimeye girmiş UK taneleri, çatlaklı ve boşluklu ancak süreksiz olmayan bir alüminosilikat yapısının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

He vd. (2012) yapmış olduğu çalışmada SEM analizi sonuçlarına bakıldığında, numune içerisinde tepkimeye girmeyen irili ufaklı uçucu kül tanelerinin arta kaldığı, çatlakların oluştuğu görülmüştür. Söz konusu mikro-çatlaklar, analiz öncesi numuneye uygulanmış olan basınç testi sonucu veya kür işlemlerinde suyun numuneden ayrılması esnasındaki büzülmelemlerden kaynaklı olabilmektedir. Geopolimer harç numunelerinden bir kısmının yüzeylerinde büyük çaplı ve yarı küresel şekilli gözenekler görülmüştür. Meydana gelen bu boşlukların geopolimer oluşumu için ilgili malzemelerin karışımının yapılması ya da üretilen karışımın kalıplara doldurulması sırasında karışım içerisindeki hava kabarcıklarından veya suyun buharlaşmasından kaynaklı oluşabileceği tahmin edilmektedir. Prizma şekilli tanecikler ise geopolimer olmayıp  $\text{Na}_2\text{O}$  ya da  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  mikrokristalleridir. Alkalitenin yüksek olduğu zaman kür işlemi sırasında suyun geopolimer esaslı numunelerden ayrılmasının ardından tepkimede rol alamamış NaOH çökelek oluşturabilmektedir. Diğer yandan ise çözülmüş olan NaOH ise tepkimeye girerek  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  oluşturabilmektedir.

## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında termik santral atığı olan uçucu külün alkali ile aktivasyonu ile üretilen vermikülit katkılı geopolimer harç numunelerinin laboratuvar ortamında yapılan deneyler ile bu deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

- Molarite arttığında mevcut silisyum ve alüminyum minerallerinin çözünmesi daha fazla olmakta, tepkimeye girmeyen uçucu küllerin azalması ile homojen yapı artmakta, boşluklu yapıdan uzaklaşmaktadır. Dolayısıyla söz konusu numunelerde birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri daha yüksek, su emme değerlerinin ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm karışımlarda birim hacim ağırlık değeri  $1,19 \text{ g/cm}^3$ - $1,55 \text{ g/cm}^3$  arasında değişim göstermiştir.
- En yüksek su emme değeri 15 M derişimli ve %30 vermikülit içeren K12 numunesinde gözlenmiştir.
- Vermikülit içeren numunelerde su emme daha yüksek değerlerde seyrederken birim hacim ağırlık değerleri ve basınç dayanımları daha düşük çıkmıştır. Çünkü boşluk oranı arttıkça birim hacim ağırlık değeri dolayısıyla da basınç dayanım değerlerinde düşme gözlenir.
- En düşük su emme oranı K7 karışımında görülürken, en yüksek su emme oranı K6 karışımında görülmüştür. Bu durum numunelerin sahip olduğu boşluk miktarı ile ilişkilidir. Bu boşluk miktarı hakkında bilgi verecek bir diğer kıstas ise numunelerin kuru birim hacim ağırlık değeridir. Öyle ki K6 numunesinin kuru birim hacim ağırlığı değeri en düşük ve  $1,19 \text{ g/cm}^3$  iken K7 numunesine ait kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek ve  $1,55 \text{ g/cm}^3$  değerine sahiptir.
- 15 M derişimli geopolimer harç numuneleri, 10 M derişiminde hazırlanmış harç numunelerine göre daha yüksek birim hacim ağırlık değerlerine sahiptir.
- En düşük basınç dayanımı değeri 10 M derişimli %70 oranında uçucu kül katkılı K6 karışımında  $1,40 \text{ MPa}$  olarak tespit edilirken, en yüksek basınç dayanımı değeri % 50 UK katkılı, 15 M derişimli K7 karışımında  $4,61 \text{ MPa}$  olarak tespit edilmiştir.

- Molarite arttıkça basınç dayanımı değeri de yüksek olmuştur. Bunun sebebinin mevcut silisyum ve alüminyumun yüksek derişimlerde çözünmelerinden ötürü olabileceği ifade edilmiştir. Diğer bir deyişle alkali derişim değeri arttıkça tepkimeye katılmayan uçucu kül miktarının azalması ile geopolimer jel yapının daha homojen bir yapıya büründüğü ifade edilebilir.
- Genel olarak kuru birim hacim ağırlık değeri yüksek olan karışımların basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Görünen porozite değerleri %30,19-%39,50 arasında değişkenlik göstermiştir. Vermikülit oranı arttıkça porozite oranlarında yükselme olmuştur. Bu durum, vermikülitin boşluklu yapısı ile açıklanabilir.
- Ultrases geçiş hızı sonuçları 1,84 km/s ile 3,0 km/s arasında değişim göstermiştir. Molarite arttıkça üretilen geopolimer harcın bünyesindeki boşluk oranı azalacağından, yani birim hacim ağırlık arttığından basınç dayanımı artar. Böylelikle ultrases geçiş hızında da artış olduğu, beton kalitesinin de zayıf ve çok zayıf arasında değiştii söylenebilir.
- Vermikülit oranı yüksek, BHA değerleri düşük olan numunelerin ısı iletkenlik katsayıları da düşük olmuştur. Isı iletkenlik katsayıları 0,373-0,794 W/mK arasında değişim göstermiştir. Bunun sebebi; vermikülit ve UK oranı yüksek, birim hacim ağırlık değeri düşük olan geopolimer malzemelerin daha boşluklu ve hafif olmasından dolayı ısı yalıtım değerlerinde iyileşme meydana getirdiği söylenebilir.
- Elde edilen geopolimer harç numunelerinden alınan örneklerin (K1,K3,K10,K12) taramalı elektron mikroskobu (SEM) vasıtası ile elde edilen analiz sonucuna göre söz konusu numunelerde çatlakların olduğu görülmüştür. Bu çatlakların oluşma sebebinin basınç dayanımı deneyinin tespiti veya analiz için örnek alınması sırasında da oluşabileceği ifade edilmiştir.
- SEM deneyi sonucuna göre numunelerde ayrıca gözenek ve çukurların olduğu görülmüştür. Bunun sebebi laboratuvar ortamında 28 gün bekletilen numunelerde mevcut suyun numuneyi terk etmesi sonucunda oluşabileceği ifade edilmiştir.
- Su emme deneyi ve ultrases geçiş hızı deneyleri için etüv kurusu haline getirilen numunelerde abartılı derecede çatlak, kırılma veya kopma türü deformasyonlar görülmemiştir.



İleriki çalışmalarda sıcak kür uygulaması uygulanarak ve numuneler daha uzun süreler ile bekletilerek geopolimer esaslı malzemeler üretilebilir. Numunelerin kimyasal özelliklerine, priz başlangıç ve bitiş sürelerine, yangın dayanımına bakılabilir. UK ile beraber silis dumanı veya yüksek fırın cürufu ile lif kullanımı gibi katkıları kullanılarak kimyasal ve fiziksel özelliklerle ilgili araştırmalar yapılabilir. Böylelikle geopolimer harçların kullanımının avantaj ve dezavantajları araştırılarak kullanımının yaygınlaştırılması yönünde adımlar atılmış olur.



## KAYNAKLAR

- Ali, O.A.A. (2016). Alkali ve Çimento İle Birlikte Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Harcının Mekanik Özellikleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 85 s.
- Arıöz, E. (2015). Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, pH ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 236 s.
- Aruntaş, H.Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21-1, 193-203.
- ASTM C618. (1998). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, No.4, 1998.
- Aydın, T., Pehlivanlı, Z.O. (2017). Jeopolimer Esaslı Gözenekli Hafif Yapı Malzemelerinin Geliştirilmesi. *Mühendislik dergisi*, 8(1): 227-236.
- Bakharev T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research*, 35, 1224-1232.
- Binici H., Eken M., Aksoğan O. (2012). Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Toros Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, *Yapı Teknolojileri Dergisi* 8 (1): 12-25.
- Castel A., Foster S. J., Bond (2014). Strength Between Blended Slag and Class F Fly Ash Geopolymer Concrete With Steel Reinforcement, *Materials and Design*, 56, pp 833–841.
- Criado, M., Palomo, A. ve Fernandez-Jimenez, A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: *Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products*. *Fuel*, 84: 2048–2054.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Saint Quantin, France.
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Saint Quantin, France, 4th edition pp 4-5.
- Doğan, H. ve Şener, F. (2004). Hafif yapı malzemeleri (pomza-perlit-ytong-gazbeton) kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik sonuç ve öneriler, *Haber Bülteni Dergisi*, s. 51-53.
- DPT (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, *Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer Çalışma Grubu Raporu*, DPT: 2617 - ÖİK: 628, Ankara.

- Duxon, P., Provis J.L., Lukey G.C. ve van Deventer J.S.J. (2007a). The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 1590-1597.
- Duxon P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A. ve van Deventer J.S.J. (2007b). Geopolymer technology: The current state of the art, *Journal of Materials Science*, 42, 2917-293.
- Duxon, P., van Deventer J.S.J. ve Provis J.L. (2008). Commercialisation of geopolymer concrete in Australia: From market push to market pull, Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings (Ed:Bellosi A., Babini G.N.), Institute of Science and Technology for Ceramics, National Research Council, Verona, Italy, 713-721.
- Elden, S. (2011). Çok Hafif Yalıtım Betonlarının Mekanik ve Isıl İletkenlik Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 61 s.
- Erdoğan, T. Y. (2013). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 757 s.
- Erseçen, S. (1992). Dünya'da ve Türkiye'de Vermikülit: MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, sayfa 19.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G. ve Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour, *Cement and Concrete Research*, 29: 1313-1321.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2005). Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator, *Cement and Concrete Research*, 35, 1984-1992.
- Fernández Pereira C., Luna Y., Querol X., Antenucci D. ve Vale J. (2009). Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers, *Fuel*, 88, 1185-1193.
- Gençel, O. (2015) Characteristics of fired clay bricks with pumice additive. *Energy and Buildings*, 102: 217-224.
- Girgin, S. (2016). NaOH ile Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Afyon, 64 s.
- Görhan, G., Kürklü, G. (2014). Alkali Tuz İçeriğinin Geopolimer Cephe Kaplama Malzemesi Özelliklerine Etkisi, Konu Başlık No: 1. Çatı ve Cephe Sistemleri ve Bileşenleri, 7. Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi Beşiktaş – İstanbul.

- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005*, İzmir, Türkiye.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J ve Rangan B.V. (2005). On Development of Fly Ash- Based Geopolymer Concrete, *ACIMaterials Journal*, Title no.101-M.
- He J., Zhang J., Yu, Y. ve Zhang G. (2012). The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study, *Construction and Building Materials*, 30, 80-91.
- Kantarıcı, F. (2013). Elazığ Ferrekrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya, 131 s.
- Kaya, M. (2011). Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Silis Dumanı Katkılı-Çimento Esaslı Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Dirençleri, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yozgat, 128 s.
- Khale, D. ve Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review, *Journal of Materials Science*, 42, 729-746.
- Kurşun, İ., İpekoğlu, B. (1995). Türkiye Silis Kumu Potansiyeline Genel Bakış, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir.
- Leiva, C., Luis, F.V., Vale, J., Pereira, C.F. (2005). Influence of the type of ash on the fire resistance characteristics of ash-enriched mortars, *Fuel*, pp 84-11, 1433-1439.
- Mane, S., Jadhav, H.S. (2012). Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 2, Issue 12, December, pp.384-390.
- Mahmut, O. (2015). Geopolimer Harç Üretiminde Elazığ Ferrekrom Cürufunun Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce, 53 s.
- Morrison, R.E. (1970). A Review of Ash Specifications. *Symposium on Fly Ash Utilization*. Pp. 24-31. Pittsburgh.
- Okucu, A. (1992). Hafif İnşaat Malzemeleri (Anorganik), Uludağ Üniversitesi, F.B.E., Y. Lisans Tezi, Bursa.
- Olivia, M., Nikraz H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, *Materials and Design*, 36, pp 191-198.

- Özmal, F. (2005). Bor endüstrisi atıkları, uçucu kül, taban külü ve alümit mineralinin çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94s.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, *Construction and Building Materials*, 22: 1315-1322.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. ve Blanco, M.T.(1998).Alkali-Activated Fly ashes A Cement for the Future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P. ve Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids Surf A*; 301: 246–254.
- Poon, C.S., Kou, S.C. ve Lam, L.,L. (1999). An Innovative Method in Producing High Early Strength PFA Concrete, *Modern Concrete Materials; Binders, Additions and Admixtures*, 131-138, ISBN: 0727728229, Thomas Telford Pres.
- Rangan, B. V. (2008). Fly ash-based geopolymer concrete, Research Report GC 4, Engineering Faculty, *Curtin University of Technology*, Perth, Australia, 44s.
- Rattanasak, U. and Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22: 1073-1078.
- RILEM Committee 73-SCB, (1988). Final Report on Siliceous by-products for Use in Concrete, *Materials and Structures*, C.21, No.121, s.69-80.
- Somna K., Jaturapitakkul C., Kajitvichyanukul P. ve Chindapasirt P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Fuel*, 90, 2118-2124.
- Şimşek, O.(2009). Beton ve Beton Teknolojisi, *Teknik Bilimleri Dizisi:10*, Üçüncü Baskı ISBN978-975-02-1012-9.
- Sagoe-Crentsil, K. ve Weng, L. (2007). Dissolution process, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I-Low Si/Al ratio systems, *Journal of Materials Science*, 42, 2997-3006.
- Shi C., Roy D. ve Krivenko P.(2006). Alkali-Activated Cements and Concretes, *CRC Press*, 392, ISBN 0203390679, 9780203390672.
- Sidhunata, van Deventer J.S.J., Lukey G.C., Xu H. (2006). Effect of curing temperature and silicate concentration on fly ash-based geopolymerization, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45, 3559-3568.

- Şahin, M. (2011). Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Çelik Tel Takviyeli-Çimento Esaslı Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Dirençleri. Yüksek Lisans Tezi. Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yozgat, 88 s.
- Toksoy, F. (1997). Vermikülit: Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu,16-17 Ekim, İzmir, Türkiye.
- Türker, P., Erdoğan P. , Katnaş, F., Yeğınobalı, A. (2009). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, ISBN: 975-8136-18-6, TÇMB/AR-GE/Y03.03, Ankara-Türkiye.
- TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim,Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,*Türk Standartları Enstitüsü*.
- TS EN 1015-11, (2000). Kâğır Harcı Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. Ankara: *Türk Standartları Enstitüsü*.
- TS EN 772-4,(2000). Kâğır Birimler, Deney Metotları- Bölüm 4: Tabii Taş Kâğır Birimlerin Toplam ve Görünen Porozitesi İle Boşluksuz ve Boşluklu Birim Hacim Kütlelerinin Tayini. *TSE*, Ankara.
- TS EN 1015-3, (2000).Kâğır Harcı Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini(Yayıma Tablası ile). *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-7,(2010). TS EN 12390-7, (2010), Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini,*TSE*, Ankara.
- TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim,Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,*Türk Standartları Enstitüsü*.
- TS EN 12504-4, (2004). Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tunçbilek, B. (1998). Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Portland Çimentosu Uçucu Kül Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 119 s.
- Uzbaş, B. ve Aydın, A.C. (2018). Uçucu Kül ve Silis Duman Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin ile İncelenmesi.*Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Sci 3 (2): 22 s.
- Vargas S.A., Dal Molin C.C.D., Vilela C.F.A., de Silva F.J., Pavao B., Veit H. (2011). The effects of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, *Cement and Concrete Composites*, 32, 653-660.

- Veit, H. (2011). The effects of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  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.
- Yeğınobalı, A. (2009). *Türkiye Çimento Mühendislik Birliği*, Çimento yeni bir çağ malzemesi, Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EIE), 1982. Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri. EIE Yayını. 82. 21-28.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hayrettin TOKAY  
Doğum Yeri ve Tarihi : NUSAYBİN-09.09.1988

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Dokuz Eylül Üniversitesi  
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce  
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : Uçucu Küllü Geopolimer Harcın Özellikleri, ISAS 2019-ENS-3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (Engineering and Natural Sciences), Ankara, Turkey, Apr 19,2019.  
Aldığı Ödüller : Başarı Belgesi, Ayın Personeli (Bartın Valiliği ve Bartın Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğüne).

### İş Deneyimi

Stajlar : Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı.  
Projeler ve Kurs Belgeleri : İdecad, C Sınıfı İSG Uzmanı, Primavera, Kamu İhale Kanunu (4734), Çelik Yapılar, Kalite Yönetim Sistemi.  
Çalıştığı Kurumlar : Deha Yapı Denetim Ltd. Şti. (2013-2014),İZMİR, Bartın Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü (2014-halen).

### İletişim

E-Posta Adresi : hayrettin.tokay@hotmail.com

Tarih : 20/06/2019 (Tez Savunma Tarihi)