



**GEOPOLİMER BETON ÖZELLİKLERİNE  
TERMAL KÜR PROSESİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET GÜMÜŞ

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. GÖKHAN GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık, 2016

Bu tez çalışması 213M294 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GEOPOLİMER BETON ÖZELLİKLERİNE TERMAL KÜR  
PROSESİNİN ETKİSİ**

**AHMET GÜMÜŞ**

**DANIŞMAN**

**Yrd.Doç.Dr. GÖKHAN GÖRHAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Aralık, 2016**

## TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet GÜMÜŞ tarafından hazırlanan “Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca ...../...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** :Yrd.Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN

**Başkan** :Yrd.Doç.Dr. Gökhan KÜRKLÜ  
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

**Üye** :Yrd.Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN  
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

**Üye** :Yrd.Doç.Dr. Gökhan DURMUŞ  
Gazi Ün., Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
...../...../2016 tarih ve  
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR  
Enstitü Müdürü

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

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

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

**beyan ederim.**

**16/12/2016**

**Ahmet GÜMÜŞ**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GEOPOLİMER BETON ÖZELLİKLERİNE TERMAL KÜR PROSESİNİN ETKİSİ

Ahmet GÜMÜŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Yrd.Doç.Dr. Gökhan GÖRHAN

Bu çalışmada ana hammadde olarak puzolanik karakteristiklere sahip olan metakaolin (MK) ve termik santral atığı olan uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Kullanılan metakaolin NG Kütahya'dan elde edilen kaolin kilinin 700 °C'de kalsine edilerek metakaoline dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Uçucu kül ise Kütahya Tunçbilek Termik Santralinden tedarik edilmiştir. Örneklerin hazırlanmasında alkali aktifleştirici olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat solüsyonu (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (SS) kullanılmıştır. Betonların üretiminde kullanılan agregalar 0-5 mm, 5-15 mm ve 15-22 mm olmak üzere üç farklı sınıfta olup, Afyon'da bulunan özel bir ocaktan temin edilmiştir.

Geopolimer beton örneklerin hazırlanmasında hammadde olarak kullanılan UK ve MK malzemeleri, alkali aktivatörler (NaOH ve SS) ile en iyi tepkimeyi verecek şekilde farklı oranlarda karıştırılmıştır. Laboratuvar tipi Pan mikserde hazırlanan karışımlar 10x10x10 cm boyutlarında metal kalıplara vibrasyon yöntemiyle yerleştirilmiştir. Ardından ilgili örnekler laboratuvar ortamında bir gün bekletilmiş ve takiben kür işlemlerinin yapılabilmesi amacıyla etüve yerleştirilmiştir. Termal kür prosesinin uygulanabilmesi amacıyla geopolimer beton örnekleri farklı süre (5 ve 24 saat) ve sıcaklıklarda (60 ve 90 °C) kür edilmiştir. Kür işlemlerinin tamamlanmasının ardından örnekler kalıplardan alınmıştır.

Öncelikle geopolimer betonların; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünen yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ile ultrases hızı değerleri 7 günlük örnekler üzerinde belirlenmiştir. Ardından örneklerin basınç dayanım testleri (7 günlük) TS EN 12390-1 nolu standarda göre yapılmıştır. Basınç dayanım testleri için 200 ton kapasiteli beton presi kullanılmıştır.

Sonuç olarak, geopolimer betonlara uygulanan kür sıcaklıkları dikkate alındığında uzayan kür sürelerinin ve UK ilave oranının artması ile birlikte örneklerin basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. 60 °C'lik kür sıcaklığının uygulandığı % 40 UK ilaveli B5-24 beton örneklerinde 30.1 MPa, 90 °C'lik kür uygulanan örneklerde ise yine % 40 UK ilaveli A5-24 geopolimer betonlarında 31.4 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Bu veriler ışığında, çalışmada üretilen geopolimer betonların uygulanabilir olduğu, bununla birlikte durabilite özelliklerinin ayrıca araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

**2016, xii + 68 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu kül, Metakaolin, Geopolimer, Alkali aktifleştirici, Beton

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **EFFECT OF THERMAL CURING PROCESS ON GEOPOLYMER CONCRETE PROPERTIES**

Ahmet GÜMÜŞ

Afyon Kocatepe University

Institute of Science and Technology

Civil Engineering Department

**Advisor:** Asst. Prof. Gökhan GÖRHAN

Metakaolin (MK) which has pozzolanic characteristics and fly ash (FA) which is a thermal power plant waste were used as main raw materials in this study. The metakaolin used in the study was obtained by calcination of kaolin clay at 700 °C obtained from NG Kütahya. The fly ash was supplied from Kütahya Tunçbilek Thermal Power Plant. Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate solution (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (SS) were used as alkaline activators in the preparation of the samples. Aggregates used in the production of concrete were of three different classes (0-5 mm, 5-15 mm and 15-22 mm) and obtained from a special furnace in Afyon.

FA and MK used as raw materials in the preparation of the geopolymer concrete samples were mixed in different proportions with alkaline activators (NaOH and SS) to achieve the best reaction. The mixtures prepared in a laboratory-type Pan mixer were placed in 10 x 10 x 10 cm metal molds with vibration technique. Afterwards, the samples were kept in the laboratory environment for one day and then placed in an oven in order to carry out the curing processes. The geopolymer concrete samples were cured at different temperatures (60 and 90 °C) and for different periods of time (5 and 24

hours) in order to apply the thermal curing processes. The samples were removed from the molds after the completion of the curing processes.

Physical properties of the geopolymer concretes such as water absorption, apparent porosity, bulk density and apparent density, and their ultrasonic velocity values were determined using 7-day samples. Afterwards, compressive strength tests (7 days) were carried out according to TS EN 12390-1 standard. A 200 tons concrete press was used for the compressive strength tests.

The results indicate that the compressive strength values of the samples increase with an increase in curing times and FA addition rate. The highest compressive strength values were obtained from B5-24 concrete samples with 40% FA addition cured at 60 °C (30.1 MPa) and A5-24 geopolymer concrete samples with 40% FA addition cured at 90 °C (31.4 MPa).

In light of this data, it can be concluded that the geopolymer concretes produced in the study are applicable, however, the properties of durability should be investigated further.

**2016, xii + 68 page**

**Keywords:** Fly ash, Metakaolin, Geopolymer, Alkaline activator, Concrete

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Gökhan GRHAN'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 213M294 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TBTAK'a teşekkür ederim.

Bu araştırma ve eğitim hayatım boyunca desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ahmet GÜMÜŞ  
AFYONKARAHİSAR, 2016

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Uçucu Kül .....	4
2.1.1 Uçucu Külün Kullanım Alanları .....	5
2.1.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması.....	7
2.1.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri .....	8
2.1.4 Ülkemizdeki Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları .....	9
2.1.5 Uçucu Küllerin Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri.....	9
2.2 Metakaolin .....	10
2.2.1 Metakaolinin Kimyasal ve Fiziksel Yapısı .....	11
2.2.2 Taze Beton Özelliklerine Metakaolin Etkisi .....	12
2.2.3 Sertleşmiş Beton Özelliklerine Metakaolin Etkisi .....	13
2.2.4 Metakaolin Karıştırılmış Pasta, Harç ve Betonların Yapıları .....	14
2.2.5 Metakaolinin Harç ve Beton Durabilitesine Etkisi .....	15
2.3 Geopolimer .....	16
2.4 Polimer Kimyası ve Geopolimerin Polimer Sınıfı.....	22
2.5 Geopolimer Kimyası.....	23
2.6 Beton.....	27

2.6.1 Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler.....	28
2.6.1.1 Agregalar.....	28
2.6.1.2 Çimento.....	28
2.6.1.3 Beton Karışım Suyu.....	29
2.6.1.4 Katkılar .....	30
2.6.2 Betonda Aranılan Özellikler.....	30
2.6.2.1 Taze Beton Özellikleri.....	30
2.6.2.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	31
3. MATERYAL ve METOT .....	33
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	33
3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler.....	35
3.3 Geopolimer Betonların Hazırlanması .....	36
3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler.....	39
3.4.1 Su Emme .....	40
3.4.2 Görünen Porozite.....	40
3.4.3 Bulk Yoğunluk .....	41
3.4.4 Birim Hacim Ağırlık .....	41
3.4.5 Görünür Yoğunluk .....	41
3.4.6 Basınç Mukavemet Testi.....	41
3.5 Geopolimer Betonların Mineralojik ve Morfolojik Analizleri .....	42
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	43
4.1 Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	43
4.2 Geopolimer Betonların Fiziksel Özellikleri.....	45
4.3 Geopolimer Betonların Basınç Dayanım Özellikleri.....	51
4.4 SEM-EDX Analizleri.....	52
5. SONUÇLAR.....	59
6. KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	68

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

$\mu\text{m}$	Mikrometre
MW	Megawatt
kWh	Kilowattsaat
NaOH	Sodyum Hidroksit
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	Sodyum Silikat
$\text{CO}_2$	Karbondioksit
CaO	Kalsiyum Oksit
$\text{SiO}_2$	Silisyum Dioksit
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alüminyum Oksit
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Demir Oksit
$\text{SO}_3$	Sülfat
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalsiyum Hidroksit
$\text{C}_3\text{S}$	Trikalsiyum Silikat
$\text{C}_2\text{S}$	Dikalsiyum Silikat
$\text{C}_3\text{A}$	Trikalsiyum Alüminat
$\text{C}_4\text{AF}$	Tetrakalsiyum Aluminoferrit

### Kısaltmalar

---

UK	Uçucu Kül
MK	Metakaolin
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRF	X Işınları Floresans
XRD	X Işınları Difraktogramı

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1 Üretimde kullanılan agregaların elek analizi. ....	34
Şekil 4.1 Tunçbilek uçucu külünün XRD difraktogramı. ....	43
Şekil 4.2 Metakoline ait XRD difraktogramı. ....	44
Şekil 4.3 CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentoya ait XRD difraktogramı. ....	45
Şekil 4.4 Geopolimer betonların görünür porozite oranları. ....	46
Şekil 4.5 Geopolimer betonların su emme oranları.....	48
Şekil 4.6 Geopolimer betonların birim hacim ağırlığı. ....	49
Şekil 4.7 Geopolimer betonların görünür yoğunlukları. ....	50
Şekil 4.8 Geopolimer beton numunelerinin ortalama ultrases hız değerleri. ....	50
Şekil 4.9 Geopolimer beton numunelerinin basınç değerleri. ....	52

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 Türkiye’de üretilen bazı UK’ların kimyasal değerleri. ....	9
Çizelge 2.2 Harçların priz başlangıç ve bitiş zamanları ve karışımların su-bağlayıcı oranları. ....	13
Çizelge 2.3 Çimentonun ana bileşenleri. ....	29
Çizelge 3.1 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri. ....	34
Çizelge 3.2 Üretimde kullanılan kimyasal malzemeler ve özellikleri. ....	35
Çizelge 3.3 1 m <sup>3</sup> geopolimer betonda kullanılan malzeme miktarları. ....	36
Çizelge 3.4 Geopolimer beton örnekleri ve uygulanan kür prosesi. ....	38
Çizelge 4.1 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu. ....	43
Çizelge 4.2 Uçucu küle ait lazer tane boyut boyut analiz değerleri. ....	44
Çizelge 4.3 Metakaolinin kimyasal kompozisyonu. ....	44
Çizelge 4.4 Metakaoline ait lazer tane boyut analiz değerleri. ....	44
Çizelge 4.5 CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentonun kimyasal kompozisyonu. ....	45
Çizelge 4.6 CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentoya ait lazer tane boyut analiz değerleri. ....	45
Çizelge 4.7 B3-5 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları. ....	54
Çizelge 4.8 A3-5 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları. ....	55
Çizelge 4.9 B5-24 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları. ....	57
Çizelge 4.10 A5-24 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları. ....	58

## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 3.1</b> Elle şekillendirilen kaolenler. ....	33
<b>Resim 3.2</b> Laboratuvar tipi değirmen.....	33
<b>Resim 3.3</b> Öğütülmüş MK malzemesi. ....	33
<b>Resim 3.4</b> Tunçbilek Uçucu Külü.....	33
<b>Resim 3.5</b> Bruker D8 Advance .....	35
<b>Resim 3.6</b> Rigaku ZSX Primus. ....	35
<b>Resim 3.7</b> Malvern Mastersizer 2000. ....	36
<b>Resim 3.8</b> Hobart Mikser.....	37
<b>Resim 3.9</b> Karışım oranlarına göre hazırlanan numune.....	37
<b>Resim 3.10</b> Etüvden çıkan geopolimer betonlar. ....	38
<b>Resim 3.11</b> Beton presi. ....	39
<b>Resim 3.12</b> Ultra ses deneyi.....	40
<b>Resim 3.13</b> Beton örneklerinin konulduğu su tankı.....	40
<b>Resim 3.14</b> SEM cihazı.....	42
<b>Resim 4.1</b> B3-5 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x500 büyütme). ....	53
<b>Resim 4.2</b> B3-5 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.....	53
<b>Resim 4.3</b> A3-5 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x500 büyütme). ....	54
<b>Resim 4.4</b> A3-5 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.....	55
<b>Resim 4.5</b> B5-24 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x500 büyütme). ....	56

<b>Resim 4.6</b> B5-24 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.....	56
<b>Resim 4.7</b> A5-24 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x500 büyötmeli). .....	57
<b>Resim 4.8</b> A5-24 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.....	58



## 1. GİRİŞ

Dünyada artan çevre duyarlılığı, yapı malzemelerinin tasarımında ve seçiminde teknik özelliklerinin yanı sıra çevresel etkilerinin de değerlendirilmesine yol açmıştır. Geleneksel betona alternatif olarak pek çok araştırma yapılmaktadır. Araştırmalarda öne çıkanlardan bir tanesi de geopolimer betondur.

İnşaat sektöründe en çok kullanılan malzeme portland çimentolu (geleneksel) betondur. Klasik betona bağlayıcılığını veren portland çimentosu ucuz ve hemen her yerde bulunan doğal hammaddelerin çok yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle fabrikada üretilen malzemedir. Portland çimentosu şebeke suyu ile tepkiyebilmesi ve sonucunda suya dayanıklı bir tepkime ürünü ortaya çıkarması ve bu üretilen hamurun yapılaşmada kullanılacak kadar olumlu mekanik özelliklere sahip olması bakımından önemli bir malzemedir. Bu olumlu özelliklere rağmen klinker üretimi yaklaşık 1500 °C sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Ayrıca elde edilen klinkerin öğütülmesi gerektiği içinde yüksek miktarda enerji tüketimine ihtiyaç vardır. Diğer yandan fırında gerçekleşen tepkimeler ve üretim esnasında kullanılan çoğunlukla fosil yakıt sebebiyle yüksek miktarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ile az miktarda diğer zararlı gaz salımına neden olmaktadır. Üretilen çimento tipine ve endüstriyel yöntemle bağlı değişiklikler olabilmekle beraber, 1 ton çimento üretiminin yaklaşık 0.9 ton CO<sub>2</sub> salımına sebep olduğu bildirilmektedir (Erdoğan 2014). Dünyada yıllık çimento üretiminin 3.5 milyar tonun üzerinde oluşu (İnt.Kyn.1) ve sektörün insan kaynaklı CO<sub>2</sub>'nin %5 ila %8'inden sorumlu oluşu (Erdoğan 2014, İnt.Kyn.2) araştırmacıları çevresel etkisi daha düşük malzeme arayışlarına itmektedir.

Diğer yandan, ekonomik anlamda büyüme eğilimi gösteren ülkelerin enerji sarfiyatlarında da artış gözlemlenmektedir. Dolayısıyla enerji tüketimindeki artışlar nedeniyle çevre kirliliği doğru orantılı olarak artmaktadır. Küresel ısınmayla ilgili sorunların çözümü içinde yenilebilir kaynaklara yönelmekte büyük fayda görülmektedir. Dünyada ve ülkemizde geri dönüşüm konusuna duyulan ilgi, alaka ve araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır (İnt.Kyn.3).

Türkiye İstatistik Kurumuna göre, Termik santrallerde 9.1 bin tonu tehlikeli olmak üzere toplam 24.2 milyon ton atık oluşmuştur. Sonuç olarak atığın %98.5'ini mineral atıklar (kül, cüruf, uçucu kül, alçıtaşı, vb.) içermektedir. Toplam atığın %48.3'ü kül dağı veya kül barajına atılarak, %21.7'si düzenli depolama sahalarında, %15'i satılarak veya lisanslı atık bertaraf ve geri kazanım firmalarına gönderilerek, %15'i ise diğer yöntemlerle (maden ve taş ocağına gönderme, belediye çöplüğüne atma, vb.) bertaraf edilmiştir (Yazıcı 2004).

Yaklaşık olarak 1000 MW'lık bir termik santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Söz konusu atıkların depolanması hem çevre kirliliği hemde maddi kayıplara neden olmaktadır (Yazıcı 2004).

Dolayısıyla uçucu kül gibi doğal puzolonik malzemelerle portland çimentosunun yer değiştirmesi sağlanabilirse, portland çimentosu tüketimi azalacaktır. Betonun durabilitesinin iyileştirilmesi ve böylece servis ömrünün arttırılmasıyla da uzun dönemde beton ihtiyacı ve betonun meydana getirdiği çevresel zararlar azalacaktır. Yapılan araştırmalar neticesinde beton üretiminde puzolanik malzemelerin kullanılması hem taze beton özelliklerine hem de uzun dönem durabilitesi iyi olan yüksek performanslı ürünlerin elde edilmesinde etkili bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır (Hamalı 2007).

Bu çalışmada uçucu kül ve metakaolin gibi puzolanik karakteristiklere sahip olan malzemeler ile alkali aktifleştiriciler kullanılarak geopolimer beton üretilmesi amaçlanmıştır. Geopolimer malzeme sentezlemesinde örneklere uygulanan kür işlemleri, nihai dayanımlar üzerinde oldukça etkili olduğundan, örneklere kür uygulanmıştır. Bu çalışmada üretilen geopolimer betonlardan optimum basınç dayanım özelliklerinin kazanabilmesi adına bazı çalışmalar yürütülmüştür.

İkinci bölümde; uçucu kül, metakolin, geopolimer ve beton hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise, geopolimer malzemelerin üretimde kullanılan uçucu kül, metakaolin, agrega ve kimyasal malzemeler hakkında detaylı

bilgiler sunulmuş ve örneklerin üretim prosesleri ile uygulanan deneyler hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde malzemelerden elde edilen bulgular üzerinde yorumlar ve tartışmalar yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Uçucu Kül

Uçucu küller elektrik üretimi yapan termik santrallerden artık malzeme olarak elde edilen, betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır. Genellikle kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşen malzemedir (Hamalı 2007).

Günümüzde Türkiye’de elektrik enerjisi kömüre dayalı termik santraller, hidroelektrik santraller ve doğalgaz santrallerinden elde edilmektedir. Termik santrallerde düşük kalorili linyit kömürleri yakılmaktadır. Elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül taneciklerinden meydana gelmektedir. Baca gazları ile birlikte atmosfere bırakılmayan daha iri yapıda olan ve kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir (Aruntaş 2006).

Artan enerji sarfiyatı, termik santrallerden elde edilen ve inorganik bir artık ürün olan uçucu kül miktarlarında artışların olmasına neden olmaktadır. Atık bir ürün olan UK’ların çevre problemlerine neden olmaması için kullanım alanlarının araştırılması son yıllarda artış göstermekle beraber henüz istenilen seviyede değildir. Araştırma seviyesinin istenilen seviyede olmamasının temel sebebi genel olarak uçucu küllerin özelliklerinin homojen olmaması ve sürekli olarak değişkenlik göstermesidir. Diğer bir deyişle UK’ların fiziksel, kimyasal, mineralojik ve puzalonik özelliklerinin yöreden yöreye değişkenlik göstermeleridir. Örnek olarak UK’lar; santralde kullanılan kömürün türüne ve yakılmadan önceki öğütülme derecesine, kullanılan kazanın türüne ve yakma sıcaklığına, çevre korunması amacıyla kömüre ilave edilen katkı maddelerine, kül toplama ve uzaklaştırma sistemlerinin özelliklerine ve diğer santral değişkenlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Güler *et al.* 2005).

Ortalama olarak 1.000 MW’lık bir termik santralden yılda 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. 1 kWh’lık enerji üretimi sonucunda atık olarak 110 g kül

meydana gelmektedir. Bu miktardaki atık külün santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması, işletme ve maddi kayıplar getirmekle beraber çevresel sorunlarıda ortaya çıkarmaktadır (Yazıcı 2004).

Bacalarda tutulan UK sayesinde hava ve toprak kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Ayrıca UK'nın depolanması veya atık şeklinde bertaraf edilmesi tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgâr erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon gibi çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Depolanma nedeniyle tarım ürünlerinde, su ve havanın kalitesinde, doğal hayatta, bölgenin ekonomik durumu ve çevre düzeninde istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilmektedir (Aruntaş 2006).

Güncel çalışmalara bakıldığında UK'nın puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak adına farklı çalışmalar yapılmış ve neticede uçucu kül aktifleştirilmiştir. Dolayısıyla yapı malzemelerinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Ancak UK tüketimini artırmak için yeni ürünlerin ve kullanım alanlarının geliştirmesi adına çalışmalara ihtiyaç vardır (Görhan *et al.* 2008).

UK'ların Dünya üzerinde daha fazla kullanım alanı bulması durumunda enerji tasarrufu, kaliteli ürün elde edilmesi ve atık malzemenin kullanımı sayesinde ekonomiye katkı sağlamanın yanı sıra; ekolojik dengenin korunması adına da önemli katkılar sağlayacağı açıkça görünmektedir.

### **2.1.1 Uçucu Külün Kullanım Alanları**

Mühendislik ve yapı imalatlarında uçucu küllerin çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Özellikle puzolan özelliği ve tek boyutlu küresel tanecik yapısı ile tercih edilen malzeme sınıfındadır. Örneğin, UK'lar tek tip siltli tanecik yapısı nedeniyle sıkışmaya faydalıdır. Hem de incelik düzeyinden dolayı donma çözülme etkisine de dayanıklılık sağlar. Bu özelliklerinden dolayı havayolu ve karayolu inşaatlarında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Stabilize karayolu yapımında su ve C tipi kül karıştırılarak

grouting uygulanmakta ve kaba agregalar arasındaki bağ arttığından dolayı daha iyi sıkışmış bir stabilize zemin elde edilmektedir (Arıöz 2009).

Ayrıca uçucu külün, asfalt betonu üretiminde de kullanıldığı görülmektedir. Tek tipli ince küresel tanecik boyutlu olan uçucu kül, asfalt beton gradasyon tasarımında filler malzeme olarak uygunluk göstermektedir. UK'nın filler malzeme olarak değerlendirilmesi agregalar arasındaki ince boşlukları doldurmakla beraber asfaltın agregalara olan adezyonunuda arttırmaktadır. Ayrıca asfaltın aşınma tabakası seriminde uçucu külün hidrofobik yapısından dolayı, soyulmayı azaltması, tekerlek izi aşınmalarını azaltmaktadır. Böylelikle asfaltın ömrünü uzatması yönüyle tercih edilmektedir. Uçucu kül atık stabilizasyonunda ve radyoaktif atıkların normalleştirilmesinde de kullanılmaktadır (Arıöz 2009).

Yapılan araştırmalarda UK, kireç ve kum ile birlikte tuğla üretiminde de kullanılmaktadır. Başka bir çalışmada UK, tuf ve kireç ile birlikte kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. UK'nın kireç ile birlikte değişik oranlarda karıştırılarak tuğla yapımında kullanılabileceği, deneysel olarak yapılan bir çalışma ile önerilmiştir. Ülkemizde tuğla üretiminde uçucu kül kullanımı 1967 yılında başlamış, daha sonra ise kullanımına ara verilmiştir. Yine 1973 ve 1979 yıllarında ise ateş tuğlası yapımında UK kullanıldığı görülmektedir (Aruntaş 2006).

1914 yılında uçucu külün beton içerisinde değerlendirilmesi bulunmuş ancak uygulamaya başlaması 1937 yılında olmuştur (Arıöz 2009). Çimentolu beton içerisinde puzolan olarak kullanılan uçucu kül, betonun yüksek olan hidrasyon ısısını dengelenmektedir. Ayrıca çimento içerisindeki kireç bileşenleriyle silisyumlu uçucu kül tanecikleri ile tepkimeye girerek bağlayıcı kalsiyum silikat hidratlar oluşturur. Bugün yapılarda kullanılan çimento hacminin % 30-40'ı yerine F tipi uçucu kül kullanılabilir. Böylelikle çimentolu beton içerisindeki hacimsel çimento ihtiyacı düşmüş olur. Bu olumlu özellikler neticesinde UK kullanımı sonrasında betonun basınç dayanımı artmakta, fiziksel ve kimyasal etkilere dayanımında ise iyileşmeler gözlenmektedir.

Baraj imalatında kullanılan sıkıştırılmış betonların hacimce % 60–70 kadarını da uçucu kül oluşturmaktadır. Bu uygulamaya Pozzocrete adı verilir ve uçucu külün küresel tanecikli formunun betonun işlenebilirliğini ve sıkışabilirliğini de kolaylaştırması nedeniyle tercih edilmektedir (Arıöz 2009).

Çimento fabrikalarında klinker üretimi esnasında da uçucu kül kullanılmaktadır. Klinkerin ihtiva etmesi gereken silis maddesi, uçucu kül içeriğinde de bulunmaktadır. Böylelikle uçucu kül hem üretim maliyetlerini azaltmakta hem de çimentonun kalitesinde fayda sağlamaktadır. UK alkali elementler içermesi nedeniyle ortam pH'ını dengelemektedir. Böylelikle çimentonun alkali agrega reaksiyonu vermesini de engeller. Ayrıca, uçucu külün incelik boyutu nedeniyle ( $\sim 2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) öğütülmeye tabi olmadan çimento fırınına atılmaktadır (Arıöz 2009).

Uçucu küller; duvar, beton boru, yalıtım malzemesi, harç, gaz beton ve cam gibi yapı malzemeleri ve elemanlarının üretiminde de kullanılmaktadır. Silis kaynağı olarak uçucu kül kullanılan gaz beton üretimleri bulunmaktadır. Filler olarak plastik ve boya üretiminde kullanılmıştır. Cam-seramik malzemelerin üretiminde UK'lar hammadde olarak değerlendirilmektedir. Deneysel bir çalışmada ise UK, fenol formaldehit reçinesi içinde dolgu maddesi olarak kullanılarak suya dayanıklı seramik görünümlü yapı malzemesi üretilmiştir. UK, pirina ile birlikte değerlendirildiğinde ahşap görünümlü ve suya dayanıklı bir yapı malzemesi elde edilmiştir (Aruntaş 2006).

### **2.1.2 Uçucu Külün Sınıflandırılması**

Kimyasal bileşen yüzdesi dikkate alındığında uçucu küllerin sınıflandırılmasında ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. Uçucu küller ASTM C 618 standardına göre F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. Toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi % 70'den fazla miktarda olan UK'lar F sınıfı olarak adlandırılırlar. Ayrıca F sınıfı uçucu küllerde CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak isimlendirilirler ve puzolonik özelliğe sahiptirler. Toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı % 50'den fazla olan uçucu küller de C sınıfına girmektedirler. C sınıfında bulunan uçucu

küllerde  $\text{CaO} > \% 10$  olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılırlar. C sınıfı küller hem puzolanik özelliğe hem de bağlayıcı özelliğe sahiptirler (ASTM C-618 2000).

TS EN 197-1 standardı incelendiğinde uçucu küllerin silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere ikiye ayrıldığı görülmektedir. V sınıfı genellikle puzolanik özelliklere sahip olmakla beraber çoğunlukla reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşmuştur. V sınıfı küllerde reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranının  $\%10$ 'dan az, reaktif silis miktarının  $\% 25$ 'den fazla olması gerekmektedir.

W sınıfı küller ise genellikle hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri bulunmakla beraber reaktif  $\text{CaO}$ , reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşmaktadır. Bu küllerde, reaktif  $\text{CaO}$  oranının  $\% 10$ 'dan fazla, reaktif silis miktarının da  $\% 25$ 'den fazla olması gerekmektedir (TS EN 197-1 2002).

UK'ların sınıflandırılmasında  $\text{CaO}$  ve sülfat ( $\text{SO}_3$ ) miktarına bakılırsa; genellikle taş kömüründen elde edilen esas yapısı silikoalüminatlardan oluşan siliko alüminöz uçucu küller adı verilmiştir. Linyit kömüründen elde edilenler ise ikiye ayrılmaktadır. Diğerlerine kıyasla daha yüksek oranda  $\text{SO}_3$  ve  $\text{CaO}$  içeren uçucu küllere sülfokalsik uçucu küller, kireç ve silika miktarı yüksek uçucu küllere ise silikokalsik uçucu küller olarak adlandırılırlar (Açıkgöz 2008).

Ayrıca bahsedilen sınıflandırmalara ilaveten bir de uçucu külde bulunan  $\text{CaO}$  miktarına göre sınıflandırma mevcuttur. Uçucu külün aktivitesi  $\text{CaO}$  içeriğiyle ifade edilir ve sınıflandırma uçucu küllerin aktivitesine göre belirlenir. Çok düşük aktiviteli küllerde  $\text{CaO} < \%3.5$ , düşük aktiviteli küllerde  $\%3.5 < \text{CaO} < \%7$  aralığında, aktif küllerde  $\%7 < \text{CaO} < \%14$  aralığında ve çok aktif küllerde  $\text{CaO} > \%14$  olacak şekilde dört farklı grupta tanımlanmıştır (Yazıcı 2004).

### **2.1.3 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri**

Termik santrallerin ve kullanılan kömürün özelliklerine göre uçucu küllerin fiziksel özelliklerinde değişkenlikler meydana gelmektedir. Uçucu küller genellikle gri renktedir

ve içeriğindeki karbon miktarı arttıkça rengi daha koyu bir hal almaktadır. Genel olarak % 60-90 camsı bileşen ihtiva eden taneciklerden meydana gelmektedir. Tane boyutunda düşünüldüğünde şekli yuvarlaktır ve çapları 1-200 µm arasında değişmektedir. Taneciklerin yaklaşık % 75'inin çapı 45 µm'den, % 50'den çoğu ise 20 µm'den daha küçüktür ve yoğunluğu ise 2.2- 2.7 g/cm<sup>3</sup> aralığında değişmektedir (Aruntaş 2006).

## 2.1.4 Ülkemizdeki Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

ASTM C 618'de UK'ların içeriğindeki S+A+F toplamı % 70 mertebesinden fazla olması istenir ve genellikle ülkemizdeki uçucu küllerin bu şartı sağlamaktadır (Aruntaş 2006).

**Çizelge 2.1** Türkiye'de üretilen bazı UK'ların kimyasal değerleri.

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TSE 639 sınırları	ASTM C 618 sınırları F Sınıfı	ASTM C 618 sınırları C Sınıfı
SiO <sub>2</sub>	27.4	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>70
CaO	47.0	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	2.4	1.41	4.76	<5	<5	<5
Na <sub>2</sub> O	0.3	3.0	0.24	2.2	-	<1.5	<1.5
K <sub>2</sub> O	-	-	1.81	1.76	-	-	-
SO <sub>3</sub>	6.2	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
K.K	2.4	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

Çizelge 2.1'de ülkemizde mevcut bazı termik santrallerden elde edilen UK'ların özellikleri verilmiştir. ASTM C 618 standardına göre Afşin-Elbistan uçucu külünün C sınıfı, diğer uçucu küllerin ise F sınıfı olduğu görülmektedir (Aruntaş 2006).

## 2.1.5 Uçucu Küllerin Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri

Uçucu küllerin puzolonik özellikleri daha çok mineralojik yapıları ile bağlantılıdır. Düşük kireçli UK'ların esas aktif bileşeni silis ve alüminadan oluşan amorf ve camsı fazdır. Rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH<sub>2</sub>) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik

özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçliler ise hem puzolanik özellik hem de bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler (Aruntaş 2006).

Uçucu kül partikülleri değişik şekillerde bulunabilirler. Bunlar camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar, deforme yapılar ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılardır (Yazıcı 2004).

Külün inceliği kullanılan kömürün öğütülme derecesiyle ilgilidir. İnceliğe etki eden diğer faktör ise UK'nın bacadan kaçmasına engel olmaktır. Uçucu kül 0.5 ile 200 mikron aralığındaki boyutlarda değişmektedir. Özgül yüzeyleri 1800–5000 cm<sup>2</sup>/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800–3800 cm<sup>2</sup>/gr dolayındadır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu 2.2-2.7 (ortalama 2.4) gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir (Görhan *et al.* 2008).

## 2.2 Metakaolin

Genel olarak killer; alüminyum, magnezyum, demir, kalsiyum, potasyum gibi elementlerin silikatlarıdır. Killer feldspatça zengin magmatik ve volkanik kayaların, kimyasal ve mekanik değişimleri sonucu oluşur. Kaolin ise feldspat, pegmatit, parfir, syenit ve gayns gibi magmadan çıkıp donan kayaların doğasal ve buna yardımcı fiziksel ve kimyasal etkenler ile aşınıp, bozunup, dağılıp, ufalanıp sürüklenmesi sonucu meydana gelmektedir (Çelikten 2014).

Kaolin kili 200 °C'de ısıtıldığında adsorbe suyunu kaybederken, 500 – 600 °C'lere geldiğinde kimyasal bağ suyunu kaybederek MK'ya dönüşür. 1000 °C ısıtmada ise mullit ve kristobalite dönüşmektedir. Sinterleme işlemi neticesinde MK bünyesindeki kristal yapılarda bozulma meydana gelir ve amorf yapılı ve yüksek puzolanik özellikli bir yapıya dönüşür. MK'lı beton veya harçlarda mekanik özelliklerde artışlar görülür. Bunun nedeni MK yapısında bulunan yüksek oranlı silis ve alümin ile birlikte çimento

hidratasyonu sonucu ortaya çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerek yeni C-S-H yapıları oluşturmasından kaynaklanır (Yazıcı *et al.* 2010, Görhan and Kürklü 2015).

MK'nın kullanım alanları arasında yüksek mukavemetli beton ve harçların üretimi, ferrocement uygulamaları, cam lifli betonlar, tamir harçları, hafif betonlar ve su izolasyonu amaçlı sıva üretimleri yer almaktadır (Yazıcı *et al.* 2010).

Örneğin, Dünyada ilk MK'lı beton örneği Brezilya'daki Jupia Barajı'nın imalatında betonun durabilitesinin artırılması amacıyla 1962 yılında kullanılmıştır. Baraj imalatındaki kullanımından sonra metakaolinin çimento ve beton içerisinde değerlendirilmesi amacıyla dünya üzerindeki araştırmalarda artış meydana gelmiştir. Araştırmaların genel amacı beton ve harç içerisindeki optimum MK miktarının belirlenmesine yönelik olmuştur. Bu çalışmalara ek olarak, metakaolinin  $\text{C}_3\text{S}$  ile kullanım kombinasyonlarındaki reaktiflik kabiliyeti de deneysel olarak incelenmektedir. Yine yapılan araştırmalarda metakaolinin varlığı taze ve sertleşmiş harç ile beton özelliklerinden çoğunu olumlu etkilediği sonucuna varılmıştır (Pera 2001, Vu 2002).

Harç ve betonun özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla MK ve kalsiyum hidroksit, hidrat oluşturulması amacıyla kullanılabilir. MK'nın mineral içeriği, hammadde kaynağı ve üretim şartları reaksiyon kapasitesini belirleyen öncüllerdendir (Vu 2002). Metakaolinin kalsiyum hidroksiti çok hızlı bir şekilde tüketmesi sebebiyle 1980'li yıllarda cam elyaf ve lifle takviye edilmiş bileşikler oluşturmasına yönelik birçok araştırma yapılmıştır. 1990'larda ise metakaolinin betonda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu esnada yapılan araştırmalar sonucunda betonun birçok özelliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir (Pera 2001).

### **2.2.1 Metakaolinin Kimyasal ve Fiziksel Yapısı**

MK içeriğinde yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ihtiva eden bir malzemedir. Silis ve alüminin çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerek yeni kalsiyum silikat hidrat (CSH) yapılar ve alümina içeren fazlar ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ,

$C_3AH_6$ ) oluşturur. Ortaya çıkan ürünler de beton ve harçların özelliklerinde pozitif artışlar meydana geldiği görülür (Yazıcı *et al.* 2010).

Metakaolin yapısal olarak oldukça küçük, çubuksu, şekilli ve köşeli formdadır. Çubuksu ve ince tanecik yapısı nedeniyle betondaki boşluklu yapıyı azaltır ve harç kıvamını azaltıcı etkisi bulunmaktadır (Tevrizci 2010). Metakaolinin genel olarak ortalama özgül ağırlığı  $2.6 \text{ g/cm}^3$ ; birim hacim ağırlığı  $0.3-0.4 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ , parlaklığı 79-82 arasında olup kirli beyaz renktedir (Siddique and Klaus 2009).

## 2.2.2 Taze Beton Özelliklerine Metakaolin Etkisi

Metakaolin katkılı betonların üretiminde su ihtiyacında farklılık gözlemlenmektedir. Bunun nedeni MK üretiminde uygulanan sıcaklık miktarı ve süresi gibi değişenlerdir. Ayrıca MK katkılı ürünlerde, MK'nın çimentonun hidratasyon sıcaklığını önemli bir şekilde etkilemektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda MK katkısının, betonun priz başlangıç ve priz bitiş sürelerini geciktirdiği ortaya konulmuştur (Çelikten 2014).

Karışım suyu sabit tutularak üretilen betonlarda, MK katkılı betonda çökme değerinin azaldığı yapılan bir araştırma neticesinde belirlenmiştir. Ancak MK katkısı çimento yerine ağırlıkça %5 gibi düşük oranlarda kullanıldığında, betonun işlenebilirliğini çok fazla etkilemediği anlaşılmıştır. Karışımlardaki MK içeriği, %1 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında önemli ölçüde kıvam kaybına yol açmıştır. Ancak, akışkanlaştırıcı katkı %1.2 oranına çıkarıldığında kıvam kaybı yaşanmamıştır. Bu durum, uygun oranda akışkanlaştırıcı içeriği ile MK katkısının kıvam sorunu yaşanmadan çimento yerine yüksek oranlarda kullanılabileceğini göstermiştir (Qian and Li 2001).

Yapılan diğer bir çalışmada, iki farklı MK kullanılmış ve harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri ile karışımların su-bağlayıcı oranları Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. MK katkılı harçların priz başlama ve priz bitiş sürelerinin MK katkısızlara göre daha geç olduğu Çizelge 2.2.'den anlaşılmaktadır. Harçlardaki MK içeriğinin artışı ile birlikte, çimento hamurunun su ihtiyacında önemli bir artış gözlenmiştir. Hazırlanan

numunelerde aynı kıvamı yakalamak için su/bağlayıcı oranı MK miktarına bağlı olarak artırılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada MK katkılı harçların su ihtiyacının mineral katkı içermeyen harçlara göre daha fazla olmasının nedeninin MK katkısının inceliği olduğu belirtilmiştir (Batis *et al.* 2005).

**Çizelge 2.2** Harçların priz başlangıç ve bitiş zamanları ve karışımların su-bağlayıcı oranları.

Numune	Su İhtiyacı	Priz Başlangıcı dakika	Priz Sonu dakika
Kontrol	%27.5	105	140
%10 MK	%32.5	155	180
%20 MK	%41.0	205	230
%20 MKC	%37.5	140	170

### 2.2.3 Sertleşmiş Beton Özelliklerine Metakaolin Etkisi

İlerleyen dönemlerde MK katkısının beton ürünlerinde dayanım ve durabilite gibi hususlarda önemli olumlu etkileri vardır. Dayanımı artırmak amacıyla optimum çimento ve metakaolin oranını düzenlemek için çok sayıda araştırma yapılmıştır (Vu 2002). Genel olarak çimento ve betona metakaolinin eklenmesi; eğilme ve basınç mukavemetini, yoğunluğunu, kimyasal dayanımını ve alkali-silika dayanımını artırdığını söyleyebiliriz. Bu olayların temelini puzolanik reaksiyonları esas alan kimyasal dayanım ve partikül doldurma özelliğini esas alan fiziksel dayanım olduğu söylenebilir.

MK eklendiği ürünlerde portland çimentosunun hidrasyon prosesine etki eden yeni bağlayıcı bileşiklerin oluşumuna neden olur. Ayrıca metakaolinin partikül boyut dağılımı portland çimentosundan farklıdır. Partikül doldurma özelliğini esas alan fiziksel dayanım her iki malzemenin sahip olduğu partikül boyut dağılım fonksiyonları arasındaki aralığa bağlıdır. Dolayısıyla MK'nın inceliği portland çimentosunun inceliğinden ne kadar fazlaysa ürüne daha yüksek yoğunluk ve dayanım vermekte ve boşluk doldurucu özelliği artmaktadır (Vu 2002).

## 2.2.4 Metakaolin Karıştırılmış Pasta, Harç ve Betonların Yapıları

MK ihtiva eden ürünlerin yapısı üzerine yapılan çalışmalarda ileri yaştaki yapıyı etkileyen ana unsurların kalsiyum hidroksit içeriği  $[Ca(OH)_2]$ , puzolanik reaksiyon ürünleri ve porozite ile boşluk hacmi dağılımı olduğu belirlenmiştir. Bu faktörlerin bağlı önemleri değişkenlik göstermekle beraber faktörlerin birlikte gösterdiği etkiyle harç ve beton durabilitesinde artışlar meydana gelmektedir (Vu 2002, Hamalı 2007).

MK'lı ürünlerin kalsiyum hidroksit içeriği ele alındığında, hidrasyon prosesi esnasında portland çimentosunun mineral kompozisyonuna göre ağırlıkça %16-28 civarlarında  $Ca(OH)_2$  oluşur. MK'nın portland çimentosuyla kısmi olarak yer değiştirmesi sonucunda doğru orantılı olarak kireç oluşumunun azaldığı gözlenir. Ayrıca MK, puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak, ürünlerdeki  $Ca(OH)_2$  içeriğini azaltabilir. Bu azalmanın nedenini, metakaolinin karakteristiği ve içeriği ile kür süresi olarak açıklayabiliriz (Hamalı 2007).

Hidrasyon süresince meydana gelen ana kimyasal reaksiyonlar metakaolin ile  $Ca(OH)_2$ 'nin arasında gerçekleşir. Bu olay su varlığındaki çimento hidrasyonu sırasında gelişir ve kristalli kalsiyum alüminat hidratlar ve alümino silikat hidratlar ( $C_2ASH_8$ ,  $C_3AS_3H_{2x}$ ,  $C_4AH_{13}$ ,  $C_3AH_6$ ) formundaki ürünler oluşur. Son bileşim, metakaolin/kalsiyum hidroksit oranı ve reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Böylelikle yeni kristal ürünlerin puzolanik reaksiyonlar sonucunda oluşumu  $Ca(OH)_2$  içeriğini azaltırken pasta ile betonun yapısını ve özellikle agrega ile matris arasındaki geçiş ara yüzünü geliştirir (Vu 2002).

Porozite ve boşluk boyut dağılımı incelendiğinde, portland çimentosunun metakaolin ile yer değiştirmesi, pasta ve betondaki hem toplam poroziteyi hem de boşluk boyut dağılımını etkilediği görülmüştür. Bunun sebebi metakaolinin puzolanik aktifliği ile metakaolin partiküllerinin pasta ve beton içerisindeki dispersiyon karakterlerinin bir sonucudur. Ambroise, Pera ve Maximilien'in yapmış oldukları araştırmalarda kısmi yer değiştirme oranının ağırlıkça % 50'ye yükseltilmesi sonucunda toplam porozite de önemli artışlar gözlemlenmiştir (Hamalı 2007). Bu olayın ana sebebi metakaolin

kariştirilmiş çimentoların normal kıvamdakine göre hızlı yükselmesidir. Ayrıca, pastaların aynı su/bağlayıcı oranına sahip olduğu durumlarda daha yüksek toplam porozite bulunmuştur (Frias and Cabrera 2000).

MK'lı pastaların priz alması esnasında toplam porozitelerindeki değişim oldukça karmaşıktır. 20 °C'de kürleştirilen, 0.55'lik sabit su/bağlayıcı oranı sahip ve metakaolinin ağırlıkça % 10 ile % 25 arasında değiştiği pastaların kullanıldığı çalışmada kürleşmenin ilk 24 saatinde bu pastaların toplam porozitesi sade pastaninkine benzeyen bulunmuştur. Daha sonra, bütün pastaların porozitesindeki düşüş hidrasyon süresi 28 güne doğru ilerledikçe devam etmiştir. 28 günden sonrasında ise porozitedeki azalma ihmal edilebilecek seviyede olmuştur. Ayrıca porozitedeki değişim kür süresiyle beraber metakaolinin içeriğine de bağlıdır. Bu yüzden portland çimentosu ile metakaolinin kısmi olarak yer değiştirilmesinin, pasta ve harçtaki toplam poroziteyi arttırdığı sonucu çıkarılabilir (Frias and Cabrera 2000).

### **2.2.5 Metakaolinin Harç ve Beton Durabilitesine Etkisi**

Beton ve harç ürünlerinde kullanılan malzemelerin kalitelerinde, fiziksel ve kimyasal prosesler sonucunda azalmalar meydana gelir. Fiziksel bozulmaların ana sebebi yüzeysel aşınma ve çatlak oluşumudur. Kimyasal bozulmaların sebepleri; agresif akışkanlar ve sertleşmiş çimento pastası bileşenleri arasında gerçekteşen reaksiyonlar, sertleşmiş pasta bileşenlerinin hidrolizi ve leaçing ile genişleyen ürünlerin oluşması şeklinde sıralanabilir (Vu 2002).

Betondaki bozulmaya yol açan nedenler genellikle bağlayıcı tarafından yönetilmektedir, bu yüzden bağlayıcı maddenin betonun durabilitesine etkisi büyüktür. Yapılan araştırmalar neticesinde metakaolinin portland çimentosu ve beton durabilitesi üzerine etkilerinin kompozisyon, puzolanik aktivlik ve eklenme oranı gibi faktörlere dayandığı sonucu çıkarılmaktadır. Eklenme oranının yani çimentonun metakaolin ile yer değiştirmesi oranının, harç ve beton durabilitesinin arttırabileceği bilinmektedir. Bu özellik temelde Ca(OH)<sub>2</sub> içeriğindeki azalma ve harç ile betondaki pastanın mikro yapısının geliştirilmesine bağlıdır (Vu 2002).

Harç ve beton ürünlerinde kimyasal gelişmenin portland çimentosunda bulunan  $C_3A$  içeriğine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Metakaolin karıştırılmış ürünlerde ise  $C_3A$  seviyesi, metakaolin içeriğine kuvvetli bir şekilde bağlıdır. % 10'a kadar olan yer değiştirme oranlarında, metakaolin karıştırılmış harçlardaki genişleme portland çimentosu içerisindeki  $C_3A$  içeriği tarafından kontrol edilmektedir. Bu etki, daha yüksek yer değiştirme oranlarında (ağırlıkça % 15-25) düşmektedir. Bundan dolayı genişleme riski metakaolin karıştırmaya bağlı olarak azalmakta ve buda daha yüksek durabilitelere ulaşmaktadır (Vu 2002).

Yapılan çalışmalarda sülfat etkilerine ve deniz suyuna karşı MK'lı ürünlerin dayanımı artırdığı belirlenmiştir. Portland çimentolu ürünlere göre metakaolin eklenmiş betonlarda oluşan genişlemenin, orta veya yüksek  $C_3A$  içeren portland çimentosu kullanıldığı zaman, oldukça azaldığı belirlenmiştir. Bu, % 5'lik  $Na_2SO_4$  çözeltisi içerisinde 520 gün bekletilen malzemedeki çatlak dayanımını yükseltmiştir. Yapılan çalışmalar, minimum seviye olarak % 15'lik yer değiştirmenin iyi bir sülfat dayanımı için sınır olabileceğini belirtir. Bunun altında yatan en büyük faktör uygun bir şekilde azaltılmış  $Ca(OH)_2$  içeriğidir. Bütün pasta karışımlarına % 0.4-1 arasında klor eklendiği zaman; % 20'ye kadar metakaolin karıştırılmış pastanın boşluk solüsyonu içerisindeki klor iyonu konsantrasyonunun, aynı yaştaki kontrol pastasındakinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu etki,  $OH^-$  konsantrasyonundaki azalmayı yok etmektedir. Sonuç olarak, sade ve metakaolin eklenmiş pastaların boşluk solüsyonundaki  $[Cl^-]/[OH^-]$  oranı, aynı dozda sodyum klorüre maruz bırakıldıklarında, benzer bulunmuştur. Aslında boşluk solüsyonundaki pH değerinin düşürülmesine rağmen metakaolin eklenmiş portland çimentosu pastasının pH değeri 12.5'i aşmıştır. Bu nedenle, metakaolin oranı %20'ye kadar olan betonların, çelik korozyonu riskinin oldukça az olduğu görülmüştür. Ağırlıkça % 10'a kadar olan metakaolin karıştırma oranlarında üretilen betonların, mineral ve organik asitlere direncinde anlamlı bir yükselme bulunmuştur (Vu 2002).

### **2.3 Geopolimer**

Geopolimerler kimyasal aktivatörler ve su ile tepkimeye girerek kısmen veya tamamen çözünen toz bağlayıcılardan elde edilir. Toz bağlayıcılar genellikle öğütülmüş yüksek

fırın cürufu, uçucu kül, veya metakaolin gibi bir alümino silikatlardır. Kimyasal aktivatörler ise yaygın olarak sodyum hidroksit veya sodyum silikat gibi bir alkali çözeltileridir ve bu nedenle bu malzemelere alkali aktive ismi de denilmektedir. Geopolimerlerin basınç dayanımlarına aktivatör konsantrasyonu önemli etki yapmaktadır. Geopolimerleşme sürecinde kullanılan ana malzeme tek veya birkaç farklı malzeme kombinasyonundan oluşabilir. Düşük kalsiyum içerikli örneklerde geopolimer ismi tercih edilirken, cüruf gibi daha yüksek kalsiyum içerikli örneklerde alkali aktive ismi kullanılmaktadır. Ancak başka metal cürufları kullanılabildiği gibi, asit çözeltileri veya başka aktivatörler kullanan geopolimerler de mevcuttur (Erdoğan 2014, Xu and Van Deventer 2002).

Yüksek fiziksel özellikler gösteren inorganik kimya ürünlerine içinde bolca barındırdığı toprak mineralleri ve termoset polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla benzer reaksiyonlarla elde ediliyor olmasından dolayı geopolimer adıyla Prof. Dr. J. Davidovits tarafından isimlendirilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin plastiği andıran parlak ve pürüzsüz yüzeyleri olması polimer isimlemesinin uygunluğunu göstermektedir. Geopolimer prosesi polimerleşme süreci olup, özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondensasyonu sonucu oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. 750 °C'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40–100 °C) fırınlanmasıyla elde edilen ürünler geopolimer malzemelerin en iyi özelliklerini gösterdiği şartlardır (Silva and Crensil 2008).

Kısaca hidrotermal polikondensasyon sonucunda içindeki suyu hem kimyasal hem de fiziksel yollarla vererek zeolit kayaçlarına benzer tanecik yapısına ulaşan, ancak zeolit kristallerinden farklı olarak amorf üç boyutlu hegzagonal moleküler bağ yapıda olan alümino silikat toprak malzemelere geopolimer denilmektedir (Keyte and Van Deventer 2006). Zeolitle arasındaki farklardan biri de 80 °C'de sentezlenebiliyor olmasıdır ve bu fark sayesinde yapısındaki su moleküllerinin bir kısmını da tutabilmektedir (Zeybek 2009).

1950 yılında Victor Gluchowsky alkali aktive alumino silikat hidratlarla hidrosodalit elde edilmesi çalışmalarını başlatmıştır ve böylelikle zeolitin temelini oluşturmuştur. Gluchowsky, tortul kayaların volkanik etkilerle başkalaşım zeolit kayalara yüksek basınç düşük sıcaklıklarda dönüşümüne benzer bir aglomerasyon mekanizmasının, laboratuvar şartlarında metakaolinit ve diğer kil toprak malzemelere uygulanması ile sert seramik yapılı malzemeler üretilbileceği fikrini ortaya atmıştır (Komnitsas and Zaharaki 2007).

Çeşitleri incelendiğinde yerkabuğunda çokça bulunan Si, Al gibi elementler içerdiği, çokça amorf oldukları ve tekrar eden (-Si- O-Si- veya -Si-O-Al-O-Si- gibi) 1-, 2-, veya 3- boyutlu yapıları organik polimerlerinkine benzetildiği için geopolimer ismi 1970'li yıllarda önerilmiştir. Ancak benzer kimyasal yapıdaki sistemler 1930'lu yıllardan beri bilinmektedir (Erdoğan 2014). Cüruf gibi kalsiyum açısından zengin sistemlerde, çimento hidrasyonunda oluşana benzer kalsiyum silikat hidrat jeli (C-S-H) de oluşmaktadır. Kullanılan toz bağlayıcı, aktivatör ve kür koşullarına bağlı olarak asit ve başka kimyasallara portland çimentosu hamuruna kıyasla daha iyi dayanabilen, içyapı bozulmaları göstermeden 1000-1200 °C sıcaklığa maruz kalabilen (Erdoğan 2014), alkali agrega genişmesi düşük, donma-çözülme, sülfat ve korozyon dayanıklılığı yüksek geopolimerler yapmak mümkündür. Geopolimerlerin içeriğindeki Si:Al oranına göre dayanım ve elastik modülü değişkenlik göstermektedir. Örneğin; 100 MPa civarında dayanıma sahip veya oda sıcaklığında 4 saatte 20 MPa dayanıma ulaşan örnekler mevcuttur. Ayrıca, bazı geopolimerik ürünler oda sıcaklığında priz alabilmekte ve dayanım kazanabilmektedir. Ancak geopolimerli karışımların portland çimentolu sistemlerle mukayese edebilen dayanımlara erişebilmesi için 40 ila 80 °C'de 6 saat veya daha fazla kür gerektiren çalışmalar, literatürde daha yoğun bulunmaktadır (Paloma *et al.* 1999, Hardjito *et al.* 2005).

İdeal aktivatör konsantrasyonu geopolimerin dayanımında artış gerçekleştirmektedir. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matris de bulunan serbest OH<sup>-</sup> iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da oluşabilmektedir. Geopolimerlerin yaşı ve kür sıcaklığı da örneklerin basınç dayanımında etkili olan diğer değişkenlerdir. Bununla

birlikte bu değişkenlerin etkili olabilmesi için geopolimerizasyon süresinde ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır (De Vargas *et al.* 2011). Kullanım alanı olarak geopolimerlerin ağır metallerin (Zhang *et al.* 2008), toksik malzemelerin (Van Jaarsveld *et al.* 1997) ve radyoaktif atıkların (Shi *et al.* 2006) hapsedilmesinde kullanımı önerilmiştir.

Genellikle geopolimerizasyon olarak adlandırılan alkali aktivasyon, iyi yoğunlaştırılmış ve çimento özellikli kompozitlerde camsı yapıları değiştiren kimyasal bir proses olarak tanımlanmaktadır (De Vargas *et al.* 2011). Alkali aktifleştirici çözeltiler Al ve Si oksitlerinin çözülmesinde etkindir. Dolayısıyla, geopolimerler yaygın aktifleştiricilerden potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum silikat gibi alkali özelliği güçlü çözeltiler ile alümino silikat reaktif malzemeler ile sentezlenir (Palomo *et al.* 1999, Somna *et al.* 2011, Brougha and Atkinson 2002).

Kimyasal bileşim olarak geopolimerler zeolite benzer amorf mikro yapıya sahiptirler (Xu and Van Deventer 2000). Geopolimerler polimerik Si-O-Al-O kafesinden bu kafes de SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> bileşiklerinden oluşur. Burada bileşikler bütün oksijen atomlarını paylaşır. Alüminyumun balans değerinin 4 olması oksijene göre negatif bir balans yaratır. Bundan dolayı K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> ve Ca<sup>+2</sup> gibi katyonların varlığı matristeki dengeyi sağlamak için gereklidir (Swanepoel and Strydom 2002).

Bir mühendislik malzemesi olan geopolimer, bol hammadde kaynaklarına sahiptir. Ayrıca uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklardan ve yan ürünlerinden de elde edilebilmektedir. Öte yandan geopolimer malzemelerin kullanımının artırılması hem enerji tasarrufu hemde çevre korunumuna katkı sağlayacaktır. Doğal alüminosilikatlar düşük rölatif sıcaklıklarda (600 °C ~ 800 °C), ısıl süreci uygun geopolimerik hammaddeleri sağlar. Enerji tüketimi azdır. Az miktarda CO<sub>2</sub> açığa çıkar. Geopolimerler, alüminosilikat reaktif malzemelerin, kuvvetli alkali çözeltilerle düzenli karıştırılmasıyla sentezlenebilir. Daha sonra oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta kür edilir. Kısa bir zaman diliminde belirli bir dayanım elde edilir. Dolayısıyla basit hazırlama yöntemine sahiptirler. İyi hacim stabilitesi mevcuttur yani geopolimerik bağlayıcıların büzülme değerleri diğer bağlayıcılara oranla daha düşüktür.

Geopolimerler, prizin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının yaklaşık % 70'ini kazanabilirler. Uzun seneler dayanımından çok fazla kayıp vermeden dış etkilere ve çevre şartlarına karşı dayanabilmektedirler. Geopolimer malzemelerin avantajlarından diğeri ise yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve düşük ısı iletkenlik göstermesidir. 1200 °C'ye kadar önemli bir zarar görmeden dayanabilirler. Isıl iletkenlikleri ise diğeri yapı malzemelerine göre düşük olup 0.24 W/mK ~ 0.3 W/mK arasındadır (Swanepoel and Strydom 2002).

Kısaca geopolimerler bol ham madde kaynağına, düşük CO<sub>2</sub> yayımına, düşük enerji tüketimine, düşük üretim fiyatına, yüksek erken dayanıma ve hızlı dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Bu olumlu özellikleri sayesinde geopolimerler mühendislik alanında inşaat, otomotiv, havacılık, metalürji ve plastik endüstrisinde kullanıma uygundur. Ayrıca atık yönetimi, sanat ve dekorasyon gibi benzer birçok alanda kullanıma uygun hale gelmiştir. Geopolimerlerin yaygın kullanıldığı alanlardan biride toksik atıkların değerlendirilmesidir ve giderek yaygınlaşmaktadır.

Mısır'daki piramitlerin ve Roma'daki amfi tiyatronun mikroyapısı ele alındığında sertleşmiş geopolimerik malzemelerin mikroyapısıyla benzediği görülmektedir. Bu yüzden eski yapılarda doğal malzemelerden ziyade geopolimerizasyon esasına dayanan üretimin olduğu düşünülmektedir. Konuyu aydınlatmak için, birçok bilim adamı, eski zamanlarda geopolimer teorilerinin olup olmadığını ve eski yapıların bu teoriler üzerine kurulup kurulmadığını belirlemek için araştırmalar yapmaya devam etmektedirler (Li *et al.* 2004).

Düşük sıcaklıklarda aktive edilmiş UK'lar geopolimer üretiminde tercih edilmektedir. Portland çimentosu yerine uçucu kül kullanılabilir. Bunun sebebi, çimentonun hidrasyonu sonucu meydana gelen kalsiyum hidroksit UK'nın doğal olarak içeriğinde bulunan SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile reaksiyona girerek puzolanik reaksiyona girer. (Rattanasak and Chindaprasirt 2009).

Üretilen malzemenin dayanımını NaOH çözeltisinin konsantrasyonu değiştirmektedir (De Vargas *et al.* 2011, HU *et al.* 2009, Bakharev 2005). Karışımlar oda sıcaklığı veya

belirli bir sıcaklıkta hazırlanabilir. Serbest  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$  tetrahedral yapısı meydana gelir. Üretim aşamasında uçucu külün ortam sıcaklığında reaksiyonu düşüktür (Somna *et al.* 2011).

Dayanımın yüksek olması istenen geopolimer ürünlerde F sınıfı (Schmucker and Mac Kenzie 2004) ve kalsiyum oranı yüksek UK'lar kullanılabilir (Chinda *et al.* 2007). UK'lı geopolimer ürünlerinin yapısı incelendiğinde reaksiyona girmemiş UK, aluminosilikat jel ve diğer kristal fazları içerdiği gözlenmektedir (Lecomte *et al.* 2006). F sınıfı uçucu külün iyi bir kaynak olduğu ve NaOH'in daha etlen bir aktivatör olduğu araştırmalar neticesinde anlaşılmıştır. Yapılan araştırmalarda NaOH ile sodyum silikat solüsyonu ile birlikte değerlendirilmesi neticesinde yüksek mekanik dayanımlar elde edildiği görülmüştür (Fernandez-Jimenez *et al.* 1999). Araştırmalarda cam suyu ile NaOH birlikte değerlendirildiğinde, örneklerin 24 saat içerisinde dahi önemli dayanım kazandıkları bulunmuştur (Fernandez-Jimenez and Palomo 2005, Fernandez-Jimenez and Palomo 2003).

Hemen hemen bütün killi toprak türleri (kaolin, montmorillonit, pirofilit, muskovit, klorit ve laterit vb.) alkali soda ( $\text{NaCO}_3$ , NaOH, KOH) ile tepkimeye girerek ısı etkisinde katılaşmaktadır. Killi toprak türlerinden özellikle kaolin kili içerisinde yüksek miktarda bulunan Al ve Si elementlerinin oksitli bileşikleri bağlayıcılık ve hacimsel tokluk sağlayıcı monomerler oluşturabilmektedir. Alkali ortamda organik kimya ürünü bakalit gibi polimerler için söz konusu olan termoset hidrotermal koşullar, kaolin ve benzeri kil tiplerine alkali tuz eşliğinde (NaOH) uygulanmış; feldispatoit ve zeolit türü kayaların yapay olarak eldesi araştırılmıştır. Kaolinit kili ve alkali aktifleştiricilerin etkisiyle 15 MPa basınçla sıkıştırılmış pastanın 100–130 °C'de sunta üzerine 30 bar basınçlı buhar pres ile preslenmesiyle yanmaz ahşap panel 1972 yılında üretilmiştir. Prof. Dr. Joseph Davidovits ve arkadaşları silisyum içeren monomerlerin, elde edilen polimer malzemenin ana bileşenlerini oluşturması sebebi ile bu prosese "Siliface" ismini vermişlerdir. Doğal ve yapay minerallerin alkali tuz ve alkali silikatlarla kimyasal reaksiyona girmesiyle oluşan yarı seramik genellikle üç boyutlu hegzagonal kristal yapıya bağlayıcı, çimento, harç, rezene tipinde de ürünler geliştirmişlerdir. Bu

ürünler yüksek beton üretimi, refrakter, uçak kabin malzemesi gibi üretimler için kullanılmıştır (Zeybek 2009).

Yüksek fırın cürufu ihtiva eden ve alkali tuzların hidrolik bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimer betonlarda yüksek basınç dayanımı, esneklik, erken dayanım ve yüksek asit direnci gözlemlenmiştir. 1984 yılında Amerika'da havaalanı betonu dökümünde portland çimentolu betonla karıştırılarak kullanılmış ve 6 saat içinde uçağın inebileceği dayanım ve sertlikte beton elde edilmiştir ve havaalanı betonunu 28 günlük basınç dayanımı ise 80 MPa'dır (Zeybek 2009).

#### **2.4 Polimer Kimyası ve Geopolimerin Polimer Sınıfı**

Monomer yapıdaki molekül ve elementlerin kimyasal ve fiziksel etkileşmesi neticesinde oluşan uzun moleküllü zincir bileşik yapıya polimer adı verilir. Malzeme biliminin önemli konuları arasında polimer kimyası ve teknolojisi yer almaktadır. Polimer kimyası sanayi ve sağlık alanında üretilen yeni ürünlerle desteklenmektedir. Kompozit malzeme oluşumunda ve plastik malzemeler polimer ürünlere örnektir. Ayrıca pek çok sentetik ve doğal polimer madde mevcuttur. Sentetik olarak üretilen ilk polimer ise bakalıttır. Organik kimya ürünleri olan alkol, aseton, poliester petrol esaslı PVC (polivinil klorür) birer polimerdir. Biyokimya ürünü şeker, lipid ve proteinler de organik polimer bileşiklere örnektir. C; N; O; H elementlerinden monomerleri oluşan polimerler organik polimerdir ve canlı kimyasında sık bulunurlar. İnorganik polimerler ise monomerlerinin ana bileşenini halojen, metal, metaloid ve maden elementlerinden oluşan polimerlerdir (Aröz 2009). Genel olarak polimerler kovalent bağ yapısındadır. Kovalent bağ yapısında molekül ve elementler arasında son enerji düzeylerinde elektron paylaşımı ile oluşur.

Polimer yapının oluşumuna polimerizasyon prosesi adı verilir. İki tip polimer yapısı vardır. İlki, molekül zincirlerinin birbirinden ayrı olduğu ve birbiri üzerinde kayabildiği monomerlerin uzun zincir şeklinde bağlandığı termoplastik polimerlerdir (katılma polimerizasyonu). İkincisi yüksek ısı ve basıncın uygulandığı vulkanize işlemi ile sert ve akıcı yapıda olmayan çapraz bağ yapılı (yoğuşma polimerizasyonu) termoset

polimerlerdir. Termoplastik polimerlerde monomerler birleşirken yan ürün vermezler. Ayrıca termoplastik polimerlerin, tek tip monomerin zincir bağlarından oluşmalarına homopolimer ve birden fazla cins monomerin birleşiminden oluşmalarına da kopolimer adı verilir (Arıöz 2009). Bu tip polimerlerde monomerleri oluşturan moleküller zayıf Van-der Waals bağları ile bağlıdır ve monomerler arasındaki uzun zincir bağ yapısı kuvvetlidir. Isıtma uygulandığında bağ yapısı gevşer esnek ve akıcı bir malzeme oluşur. Yapıları yarı kristal veya amorf halde olmasından dolayı eritilerek yeniden şekillendirilebilirler. Bu yönüyle termoset polimerlerden ayrılırlar. Termoset polimerler ısı ve basınç etkisiyle bir kez şekillendirildikten sonra yeniden şekillendirilemezler. Bu tip polimerler monomerlerin molekül yapısında bulunan bir ürünün yan ürün olarak ayrılması ve diğer farklı yapıdaki monomerlerin uygun bağları oluşturularak yüksek basınç ve ısı altında birleşimi ile oluşur (Arıöz 2009). Poliester ve epoksi ise termoset polimer yapıdadır. Polimer üretim metodu kondansasyon (yoğuşma), addition (katılma) ve plazma yöntemleri olmak üzere sentetik olarak laboratuarda 3 şekilde gerçekleştirilmektedir.

## 2.5 Geopolimer Kimyası

Genel olarak geopolimerizasyon prosesi silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve 750 °C da fırınlanmış kaolinit kili (metakaolinit) gibi alumino-silikat yapıdaki toprak katımlarla alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye girmesi ile başlar. Katı hammadde kompozisyonu, kimyasalların karışım oranları, uygulanan kalsinasyon işlemi ısı ve süresi veya ısı küre bağı olarak elde edilecek ürünün fiziksel özellikleri değişmektedir (Zeybek 2009).

Yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondensasyon (çoklu yoğuşma) hareketlerini kapsayan, ekzotermik kimyasal prosesese geopolimerizasyon denilmektedir (Zeybek 2009).

Genel olarak geopolimer, fırınlanan kil içinde bulunan aluminatlar ve silikatlarda bulunan oksijen atomu elektronlarını paylaşarak kovalent bağlı bileşik oluşturmasıyla açıklanabilir. Silikat ( $\text{SiO}_2$ ) mineralleri son derece kararlı bileşiklerdir. Alkali

aktifleştiricilerin SiO<sub>2</sub> monomerlerinin heliks üç boyutlu ađ yapısını zayıflatması ilerleyen tepkime sürecinde geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al sialatların oluşumunu sağlar (Zeybek 2009).

Üretimlerde moleköl yapısını belirleyici olan, jeolojik toprak kaynağı ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si: Al molar oranıdır. Si:Al molar oranının 1 olduğu geopolimer ürünlerde yangından koruyucu ürünler ve zeolit kristaline benzeyen tuğla seramik gibi ürünler elde edilebilir. Oran 2 olduğunda radyoaktif atıkların depolanması ve seramik amorf arası yapıda geopolimer ürünler üretilmektedir. Oran 3 olduğunda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta ve 1000 °C dayanabilen malzemeler üretilmektedir. Si:Al oranı 3'ün üzerine çıktığında dolgu malzemesi köpükler üretilir. Si:Al>15 olduğunda 2 boyutlu moleköl ađ yapısında geopolimer pastası oluşmakta ve bu yapı savaş uçaklarında kullanılabilir nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilir. Mikromoleköl yapı da gözlemlenerek ani soğutma ve ikincil fırınlama işlemleri ile emayeleşme, yüzey parlaklığı gibi dekoratif özellikler geopolimere kazandırılabilir (Zeybek 2009).

Geopolimerizasyon süreci karışım içersindeki alkali tuzların da etkisiyle ekzotermiktir. Su moleküllerinin dehidratasyonu geopolimer polikondensasyonunda önemli bir rol oynar. Bazı malzemelerden basınç dayanım özelliği olmayan zayıf yapılı karışımlar elde edilirken uygun oranlarda Al-Si bileşiği bulunduran ve serbest kalsiyumun düşük olduğu mineral kompozisyondaki uçucu küllerle (F tipi uçucu kül) ya da 750 °C'de fırınlanmış metakaolinit (MK750) gibi ham maddelerle yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri olan malzemeler elde edilebilir. Fırınlanmamış kaolin kili ise daha düşük basınç dayanımı vermektedir (Rangan *et al.* 2005). Hammaddeye uygulanan etöv işlemleri; boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamakta ve kompozisyon içersindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta böylece üretilen ürünün reolojik özelliklerini iyileştirmektedir (Brew and Mackenzie 2007).

Geopolimer karışımlar 40–100 °C sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutularak polimerizasyon süreci uzatılır. Böylelikle üretilmek istenilen geopolimer malzeme özellikleri de

iyileştirilmesi sağlanır. Geopolimer kimyasal mekanizması ve tepkime entalpi değerleri tam olarak tanımlanamamakla birlikte, metakaolinit içersindeki silisyumlu alüminyumlu oksit parçacıkların üç boyutlu tetrahedral bağlı termoset polimer mikro moleküler yapıyı oluşturmasıyla elde edilen yarı camsı-amorf, seramiksi yapı oluşmaktadır (Komnitsas and Zaharaki 2007).

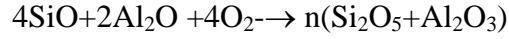
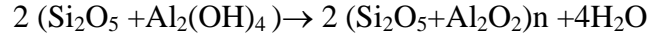
Ayrıca tepkime termo-kinematiğinin incelenmesi ile istenilen malzeme özelliklerinin geopolimere kazandırılması sağlanabilir. Alkali tuzlar içinde bulunan Na, K, Ca gibi alkali metallerin elektron vererek Si ve Al'un oksijen atomlarını paylaşarak kimyasal bağ kurmasını sağlar. Böylece Si-O-Al moleküllerinden oluşan sialat adı verilen alkali silikon okso-alüminat yapı oluşmaktadır. Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre sialat (Si-O-Al-O-), polisialat siloxo ya da polisialat di siloxo oluşmaktadır. Sialat yapısı  $SiO_4$  ve  $AlO_4$  molekülleri arasında tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluşur (Hamalı 2007). Alkali tuzlar içinde bulunan Na, K, Ca gibi alkali metallerin elektron vererek Si ve Al'un oksijen atomlarını paylaşarak kimyasal bağ kurmasını sağlar. Böylece Si-O-Al moleküllerinden oluşan sialat adı verilen alkali silikon okso-alüminat yapı oluşmaktadır.

Joseph Davidovits geopolimer tepkimesine giren ve oluşan molekül grupları aşağıdaki şekilde tanımlar:

- Si-O-Si-O- siloxo, poly(siloxo) (camsuyu alakali-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone (Rangan *et al.* 2005).

Geopolimerin ekzotermik reaksiyonu üç boyutlu oligomer makromoleküler yapıyı oluşturacak şekilde sürer. Alümino silikat hidratların ısıtılması ile hidroksil iyonları su

oluşturacak şekilde ayrışma gözlenir. Böylelikle polimerik Si-O-Al bağları oluşur. Geopolimerin yoğunlaşma polikondensasyon ile oluşumu ise şu şekilde gerçekleşir:



Buhar fazında gerçekleşen bu reaksiyon ve önceki reaksiyon ham maddeye uygulanan ön ısıtma ve 100 °C'ye kadar olan ısıtma işlemlerinin, reaksiyonlara giren alümina silikat miktarını arttırdığına ve reaksiyonları hızlandırdığına işaret etmektedir.

Silikat ve alüminatların çözünümü alkali ortamdaki hidroksil iyonlarının etkisiyle katelize ederek hızlandırır. Aşırı alkali ortam ise silikat anyonları arasındaki bağları gevşetecektir (Zeybek 2009). Sodyumun bulunduğu alkali tuzlar potasyumlu tuzlara nazaran daha fazla çözünüm göstermektedir. Bu durum daha küçük ve hafif atom olan sodyum, silikatlara daha kolay nüfuz ederek onları stabilize etmektedir. Sodyumun elektron ilgisinin daha az olması da hidroksil iyonlarını bırakmasını kolaylaştırmakta olduğu düşünülebilir (Zhang *et al.* 2008). Geopolimer malzeme özelliklerini iyileştirmek için alkali tuz ile birlikte uçucu kül içerisinde bulunan ana bileşenlerin daha düzenli çözünebilmesi için camsuyu sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) veya gibbsit [sodyum alüminat] ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ilave edilmektedir. Ayrıca kimyasalların çözünmesi için kullanılan su miktarının fazla olması ürünün basınç dayanımını azaltmaktadır. Çökelti halindeki sodyum iyonu bu tür karışımlarda daha fazladır. Bunun nedeni sodyumlardan ayrılan alüminat ve silikatların beraber reaksiyon vermesindedir. UK gibi içeriğinde yoğun olarak Al-Si içeren içeren bu kimyasallardan sodyum alüminat tetrahedral alüminyum bağ yapısı oluşumunu kolaylaştırırken, cam suyunun çapraz bağlı silikat molekülleri arttırdığı, nükleer manyetik rezonans (NMR) ile gözlenebilmektedir.

Genel olarak geopolimer hamurunun pH düzeyi 10–12 arasındadır. Geopolimerin basınç dayanımını kazandığı süreçte pH düzeyinin düşüşü de önemlidir. Geopolimerin ısıtma işlem sıcaklığı yükseldikçe hamurun pH düzeyi düşer. 85 °C de pH 10.5 iken 700 °C'lik ısıtma işlem gördüğünde geopolimer hamuru pH'ı 7.5'e düşmektedir.  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$

molar oranı ısı k r sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH düzeyini dengelemek için arttırılmaktadır.

Bilimsel araştırmaların en önemli  l tlerinden biride kullanıcıya zarar vermeyen karışımlardır. Bu yüzden pH düzeyi düşük geopolimer formüller geliştirmek doğa ve insan sağlığı açısından önemli olduğundan geopolimer kullanımını arttıracaktır (Zeybek 2009).

Tanımlanmış 9 tip geopolimer malzeme mevcuttur. Bunlar; camsuyu esaslı geopolimerler, polisiloksonat (Si: Al=1:0), kaolin hidrosodalit esaslı geopolimerler, polisialat (Si: Al=1:1), metakaolinit esaslı geopolimerler, poly (sialate-siloxo) (Si: Al=2:1), kalsiyum esaslı geopolimerler, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3), kayaa  esaslı geopolimerler, poly (sialate-multisiloxo) (1 < Si: Al < 5), silika- esaslı geopolimerler, sialate ve siloxo bağlı poly (siloxonate) (Si: Al > 5), uçucu kül esaslı geopolimerler, fosfat esaslı geopolimerler ve organik maden esaslı geopolimerlerdir ( nt.Kyn.5).

## 2.6 Beton

Beton;  imento, agrega, su ve çeşitli katkı maddelerinin belirli oranlarda bir araya getirilip homojen olarak karıştırılmasıyla meydana gelen yapı malzemesidir. Karışım yapıldıktan sonra plastik kıvamda olup zamanla sertleşerek dayanım kazanır (Gönen 2012).

Yaklaşık olarak beton hacmini %70 mertebesinde agrega, % 20 mertebesinde su ve %10 mertebesinde  imento oluşturmaktadır. İhtiyaç duyulduğunda  imento ağrılığının %5'i kadar katkı malzemelerinden ilave edilebilmektedir. Beton; fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı, yüksek mukavemetli olması,  elik ile beraber çekmeye olan dayanımının dengelenmesi, üretim ucuz ve teknoloji ile birlikte gelişmesi vb. sebepler nedeniyle en yaygın taşıyıcı yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Lkhagva 2006).

## **2.6.1 Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler**

### **2.6.1.1 Agregalar**

Agregalar beton hacminin yaklaşık olarak %70-80'ini kaplamaktadır. Kum, çakıl ve kırma taş gibi isimlendirilen inorganik malzemelerin genel adıdır. Doğada hazır bulunmaları nedeniyle beton yapımında kullanılan diğer malzemelere göre daha az maliyetlidir (Gönen 2012). Beton yapımında kullanılan agregaların sağladığı genel faydaların başında betondaki büzülme ve çatlakları azaltması gelmektedir.

Hacimsel olarak betonun çoğunluğunu oluşturan agreganın birim ağırlığı, tane boyutu, dağılımı, nemi, kompasitesi, yüzey dokusu, şekli, yabancı ve organik madde içeriği gibi fiziksel özellikleri betonun kalitesi ve özellikleri açısından büyük önem teşkil etmektedir. Dolayısıyla agreganın fiziksel özelliklerinin detaylı olarak bilinmesi gerekmektedir.

Agregaların mekanik özellikleri beton imalatında önem teşkil etmektedir. Mekanik özelliklerin arasında basınç dayanımı, aşınmaya dayanıklılık, elastik modülü, poisson oranı, tokluk ve sertlik örnek verilebilmektedir (Nebioğulları 2010).

### **2.6.1.2 Çimento**

Su ile karıştırıldığında hidrasyon sonucu priz alan ve sertleşmiş bir hamur oluşturan, daha sonra suyun altında bile dayanımını koruyan hidrolik bağlayıcılara çimento denir. (TS EN 197-1 2009). Çimento, kil ve kalkerin belirli oranlarda karıştırılarak, pişirilip öğütülmesiyle elde edilmektedir. Beton üretiminde kullanılacak çimento, kullanım yeri ve ortam şartlarına göre değişiklik göstermektedir (Yardımcı 2005). Ülkemizde üretilen çimentolar TS EN 197-1'e göre dizayn edilmektedir. İlgili standartta çimento tipine göre klinker dağılımını gösteren tabloya göre üretim yapılmaktadır. Dolayısıyla çimento dayanımları da tiplerine göre değişkenlik göstermektedir (Gönen 2012).

Çimentonun inceliğinin bilinmesi beton üretiminde önemli hususlardan biridir. Bunun nedeni incelik ne kadar fazla ise çimentonun erken dayanımının yani hidrasyon hızının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. İncelik, çimentonun özgül yüzeyi ile belirlenir ve çimento çeşitlerinin hepsi için özgül yüzeyin 2800 cm<sup>2</sup>/g'dan daha az olmaması istenir. Çimento hamurunun katılaştıktan sonra hacim değişimini belirlemek için Le Chatelier aleti kullanılır. Hacim genleşmesinin belirlenmesi çimento için önemli bir parametredir. Çimento hamuruna Vicat aleti ile uygulanan priz deneyi sonucunda da hamurun sıvı halden katı hale geçiş süresi belirlenebilmektedir (Gönen 2012).

Çimento üretiminin esası; ana madde olan kalker ve kili belirli oranlarda karıştırmak ve yüksek sıcaklıktaki fırında pişirmektir. İlk önce kilin ayrışmasından da silis (SiO<sub>2</sub>), alümin (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kalkerin ayrışmasından CaO meydana gelir. Sıcaklığın artmasıyla ortaya çıkan maddeler aralarında birleşerek silikat ve alüminatları meydana getirmektedir. Silikat ve alüminatlar çimentoya bağlayıcı özelliği kazandıran ürünlerdir. Çimentoyu oluşturan ana bileşenler ise Çizelge 2.3.'de gösterilmiştir (Gönen 2012).

**Çizelge 2.3** Çimentonun ana bileşenleri.

Bileşen Adı	Formülü	Kısa Adı	Yüzdesi
Trikalsiyum Silikat	(CaO) <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	%50
Dikalsiyum Silikat	(CaO) <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	%20
Trikalsiyum Alimünat	(CaO) <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	%7-8
Tetrakalsiyum Alümina Ferrit	(CaO) <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	%9-10

Çimentoya ilk dayanımını kazandıran ve dayanımı artıran bileşik C<sub>3</sub>S'tir. C<sub>2</sub>S ise dayanıma ilerleyen zamanda katkıda bulunur ve ötektik oluşturucu bir özelliği vardır. C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF'in maddelerinin oranlarına, kristal şekillerine ve bu kristaller içerisinde kalan minör elemanlara bağlı olarak çimentonun özellikleri olumlu ve olumsuz olarak değişmektedir (İnt.Kyn.6).

### 2.6.1.3 Beton Karışım Suyu

Betonun diğer temel malzemelerinden biride karışım suyudur. Betonun istenilen karışıma uygun işlenebilmesi sağlamakla beraber asıl görevi çimento ile beraber

hidratasyon oluşmasına neden olmasıdır. Bu nedenle karışım suyunun kalitesi yüksek olmalı ve yabancı maddeler olmaması gerekmektedir (Nebioğulları 2010).

Beton içerisinde bulunan su miktarı betonun dayanımını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Su/çimento oranının gereğinden fazla yükselmesi mukavemeti azaltmaktadır. Ayrıca reaksiyona girmeyen suyun bırakacağı boşluklar; suyun içinde bulunan klor, sülfat vb. etkenler nedeniyle beton ve donatıya zarar vermektedir (Gönen 2012).

#### **2.6.1.4 Katkılar**

Beton üretiminde betonun özelliklerini geliştirmek ve değiştirmek adına ilave edilen kimyasal veya mineral kökenli maddelere beton katkısı denilmektedir. Betonun hacim olarak %8'lik bir kısmını kapsar. Kimyasal katkılara antifriz, su azaltıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı ve hava sürükleyici; mineral katkılara ise silis dumanı, taş unu ve uçucu kül örnek olarak verilebilir (Yardımcı 2005).

#### **2.6.2 Betonda Aranılan Özellikler**

Beton karışımını oluşturan malzemelerin özellikleri ve bu malzemelerin karışım içerisindeki miktarları betonun özelliklerini etkilemektedir. Beton özellikleri, taze betonun özellikleri ve sertleşmiş betonun özellikleri olmak üzere iki kısımda incelenmektedir.

##### **2.6.2.1 Taze Beton Özellikleri**

Beton malzemelerinin karılma işleminden yani kolayca şekil verilebileceği andan itibaren betonun katıldığı ana kadarki betona istenilen şeklin verilebileceği zamandaki betona taze beton denilmektedir (Gönen 2012). Beton üretiminde izlenen adımlar sertleşmiş beton özelliklerini direkt etkilediği için taze betonun bazı özellikleri ihtiva etmesi gerekli olmaktadır (Aruntaş 2006).

Beton üretiminde kullanılan malzemelerin kolay karılabilen, kalıplara kolay yerleşen ve sıkışabilen özellikte olması gerekmektedir. Beton dökümü esnasında betonun sıcaklığı 5-33 °C aralığında olması gerekir. Betonun taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinde betonu ihtiva eden malzemelerin homojenliğini bozmaması gerekir. Çünkü kaba agregalar betonun yerleştirilmesi aşamasında çökme eğilimindedir. Yüksek kıvamdaki betonlarda da su beton içinden yükselerek yüzeye çıkma eğilimi göstermektedir. Taze betonda hacimce % 0.5-8 hava bulunmaktadır. Beton içerisinde bulunan hava miktarı dayanım ve yoğunluk gibi özelliklere direkt etki eden bir özelliktir. Ayrıca donma-çözülme direncinin artırılması sebebiyle hava sürükleyici katkılarla beton içerisindeki hava miktarı artırılabilir (Gönen 2012).

### **2.6.2.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri**

Betonunu şekil verilebilirliğinin bittiği ve katılaşmanın başladığı evreye sertleşmiş beton denir. Sertleşmiş beton kendinden beklenen dayanım, dayanıklılık ve hacim sabitliği vb. özelliklere sahip olmalıdır.

Beton için dayanım, malzeme kesitinin birim alanının taşıyabileceği maksimum yük – gerilme olarak ifade edilir. Birimi kgf/cm<sup>2</sup> veya MPa olarak gösterilir. Araştırmalar neticesinde uygun çevre şartları sağlandığında betonun dayanımının yaşla artışı gözlenmiş ve betonun ulaşabileceği dayanımının %70'ini ilk 28 günde aldığı anlaşılmıştır. Hesaplamalarda da betonun 28 günlük dayanım değerleri kullanılmaktadır. Bu yüzden beton 7 ve 28 gün ve daha ilerisi için ulaşılması gereken dayanım değerinden düşük bir değere düşmemesi gerekmektedir.

Beton ürünleri ömrü boyunca yıpranmaya ve bozulmaya karşı bir çok etkenle karşılaşmaktadır. Bu fiziksel ve kimyasal etkilere karşı betonun gösterdiği direnme kabiliyetine dayanıklılık (durabilite) denilmektedir (Gönen 2012). Dış etkilere örnek verilecek olursa; beton içerisine sızan sularda bulunan sülfatlar ve asit gibi maddeler birtakım kimyasal olaylara neden olup deformasyonlara neden olabilmektedir. Suya doygun haldeki betonun hava değişimleri ile birlikte donma-çözülme olaylarının meydana gelmesi sonucu betonda bozulmalar meydana getirebilmektedir. Ayrıca

Çimento içeriğinde bulunan alkalilerle, agregada bulunabilecek reaktif silika arasında oluşabilecek "alkali-silika reaksiyonları" betonda genleşmelere sebebiyet verecektir.

Fiziksel veya kimyasal nedenlerle beton içerisindeki suyun azalması nedeniyle betonun hacminde meydana gelen küçülmeye "büzölme veya rötne" denilmektedir. Bu yüzden sertleşmiş betonun uygun hacim sabitliğıne sahip olması gerekmektedir. Bunların dışında sertleşmiş betonda geçirimsizlik, ekonomiklik, dış görünüş ve yalıtım konuları da önem teşkil etmektedir.



### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

Geopolimer beton üretiminde kullanılan hammaddeler uçucu kül (UK) ve metakaolindir (MK). Örneklerin üretiminde hammadde olarak kullanılan MK, NG Kütahya Seramik Fabrikasından elde edilen kaolin kilinin laboratuvar tipi elektrikli ark fırınında, 700 °C’de ve son sıcaklıkta bir saat süre ile kalsine edilmesiyle elde edilmiştir. Kaolin kili kalsinasyon işlemleri öncesinde elle şekillendirilmiş (Resim 3.1), ardından elektrikli ark fırınında kalsine edilmiştir. Kalsine edilen malzemeler laboratuvar tipi değirmende (Resim 3.2) tane boyutu maksimum 250 µm oluncaya kadar öğütülmüştür (Resim 3.3).



**Resim 3.1** Elle şekillendirilen kaolenler.



**Resim 3.2** Laboratuvar tipi değirmen.



**Resim 3.3** Öğütülmüş MK malzemesi.



**Resim 3.4** Tunçbilek Uçucu Külü.

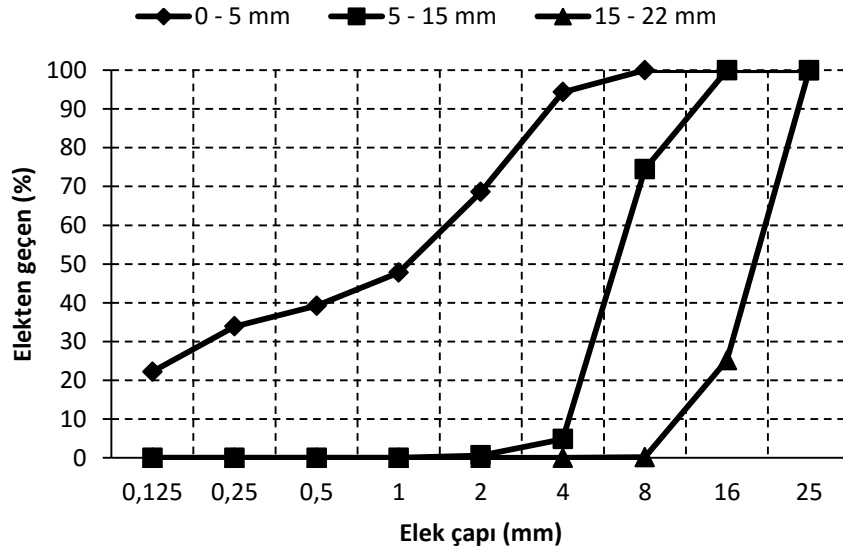
Örneklerin üretiminde MK’ya ikame malzemesi olarak UK katkısı yapılmıştır. Çalışmada kullanılan UK, Afyonkarahisar’da faaliyet gösteren KOLSAN Hazır Beton

A.Ş. firmasından bedelsiz olarak temin edilen Kütahya Tunçbilek Termik Santrali'ne ait uçucu küldür (Resim 3.4).

Geopolimer betonların üretiminde UK ve MK, alkali aktifleştiricilerle muamele edilmiş ve ardından karışımlara çimento ilavesi yapılmıştır. Bu aşamada karışımlara eklenen çimento Afyonkarahisar Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentodur. Betonların üretiminde kullanılan agregalar Afyon'da bulunan Kolsan Hazır Beton A.Ş.'den bedelsiz olarak temin edilmiş olup, 0 - 5 mm (ince), 5 - 15 mm (orta) ve 15 - 22 mm (iri) olmak üzere üç farklı sınıfta yer almıştır. Kullanılan agregaların özellikleri Çizelge 3.1.'de, agregalara ait elek analizi grafiği ise Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.

Tane Boyutu (mm)	Nem oranı (%)	Su emme (%)	Özgül Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
0 - 5	1.72	1.564	2.630
5 - 15	0.56	0.563	2.694
15 - 22	0.45	0.400	2.690



Şekil 3.1 Üretimde kullanılan agregaların elek analizi.

Geopolimer betonların hazırlanmasında UK ve MK malzemeleri, alkali aktifleştirici olarak NaOH ve sodyum silikat solüsyonu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) - (SS) ile aktifleştirilmiş ve kullanılan alkali aktifleştiricilerin özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2** Üretimde kullanılan kimyasal malzemeler ve özellikleri.

Sodyum silikat solüsyonu (SS)	Sodyum hidroksit (NaOH)
$\text{Na}_2\text{O}$ : 26.98 (%)	M: 40 g/mol
$\text{SiO}_2$ : 8.77 (%)	NaOH $\geq$ 99.0 (%)
$\text{H}_2\text{O}$ : 64.25 (%)	

### 3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler

Beton üretiminde kullanılan UK, MK ve çimento malzemelerine kimyasal, mineralojik ve tane boyut analizleri yapılmıştır. Malzemelerin mineralojik analizi Resim 3.5.’de gösterilen Bruker Marka D8 Advance Model cihazında XRD yöntemiyle yapılmıştır. Malzemelerin kimyasal analizleri, Resim 3.6.’de gösterilen Rigaku ZSX Primus cihazında XRF yöntemi ile ve tane boyut analizleri ise Resim 3.7’de gösterilen Malvern Mastersizer 2000 cihazında yapılmıştır.



**Resim 3.5** Bruker D8 Advance.



**Resim 3.6** Rigaku ZSX Primus.



**Resim 3.7** Malvern Mastersizer 2000.

### 3.3 Geopolimer Betonların Hazırlanması

Geopolimer betonların hazırlanmasında UK ve MK kullanılmış olup tüm serilerde karışımlara toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça % 5'i oranında çimento ilavesi yapılmıştır. Bununla birlikte karışımlarda MK malzemesine % 0 - % 40 aralığında değişen oranlarda UK ikamesi yapılmıştır. Geopolimer betonlar TS 802'ye göre hazırlanmıştır. Hazırlanan geopolimer betonlarda kullanılan malzemeler ve oranları Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3** 1 m<sup>3</sup> geopolimer betonda kullanılan malzeme miktarları.

No	UK ikamesi (%)	UK (kg)	MK (kg)	Çimento (kg)	NaOH (kg)	SS (kg)	İnce agrega (kg)	Orta agrega (kg)	İri agrega (kg)	Karışım suyu (kg)	Ekstra su (kg)
1	0	0.0	576.25	30.0	115.25	230.5	727.5	727.5	363.75	30.0	57.5
2	10	57.63	518.63	30.0	115.25	230.5	727.5	727.5	363.75	30.0	43.5
3	20	115.25	461.00	30.0	115.25	230.5	727.5	727.5	363.75	30.0	29.0
4	30	172.88	403,38	30.0	115.25	230.5	727.5	727.5	363.75	30.0	14.5
5	40	230.50	345.75	30.0	115.25	230.5	727.5	727.5	363.75	30.0	0.0

UK ve MK malzemelerinin aktifleştirilmesinde 12M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Çizelgede ekstra su ifadesi UK+MK karışımına eklenen suyu (Resim 3.8), karışım suyu ifadesi ise Resim 3.9'da görüldüğü üzere miksera alınan tüm malzemelere eklenen suyu ifade etmektedir.



**Resim 3.8** Hobart Mikser.



**Resim 3.9** Karışım oranlarına göre hazırlanan numune.

Çalışmada hazırlanan geopolimer beton örnekleri ve bu örnekler üzerine uygulanan kür prosesleri Çizelge 3.4’de sunulmuştur. Buna göre hazırlanan numunelerde 90 °C’de kür edilen örnekler A kodlaması, 60 °C’de kür edilen örnekler ise B kodlaması verilmiştir. Yapılan kodlamalara göre örnek verilecek olursa, Çizelge 3.3’deki 4 numaralı karışım oranlarına göre hazırlanmış ve 60 °C’de ve 24 saat süre ile kür uygulanan betona B4-24 kodu verilmiştir. Yine 1 numaralı karışım oranlarına göre hazırlanmış ve 90 °C’de ve 5 saat süre ile kür uygulanan betona ise A1-5 kodlaması yapılmıştır.

Pan mikserde hazırlanan karışımlar, 10x10x10 cm’lik metal beton kalıplara dökülmüş ve vibrasyon yöntemiyle sıkıştırılmıştır. Akabinde, vakit kaybetmeden hazırlanan örnekler termal kür işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla laboratuvar tipi etüve yerleştirilmiştir. Örnekler etüvden alındıktan bir gün sonra (Resim 3.10) kalıplarından çıkarılmış ve laboratuvar ortamında testlerin yapılacağı güne kadar (7 gün) bekletilmiştir.

**Çizelge 3.4** Geopolimer beton örnekleri ve uygulanan kür prosesi.

No	Geopolimer Beton	UK İkamesi	Kür Süresi (saat)	Kür Sıcaklığı (°C)
1	A1-5	% 0	5	90
2	A2-5	% 10	5	90
3	A3-5	% 20	5	90
4	A4-5	% 30	5	90
5	A5-5	% 40	5	90
6	A1-24	% 0	24	90
7	A2-24	% 10	24	90
8	A3-24	% 20	24	90
9	A4-24	% 30	24	90
10	A5-24	% 40	24	90
11	B1-5	% 0	5	60
12	B2-5	% 10	5	60
13	B3-5	% 20	5	60
14	B4-5	% 30	5	60
15	B5-5	% 40	5	60
16	B1-24	% 0	24	60
17	B2-24	% 10	24	60
18	B3-24	% 20	24	60
19	B4-24	% 30	24	60
20	B5-24	% 40	24	60



**Resim 3.10** Etüvden çıkan geopolimer betonlar.

### 3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler

Geopolimer betonlar termal kür işlemlerinin ardından fiziksel ve mekanik testlerin yapılacağı güne kadar laboratuvar ortamında ve oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Resim 3.11’de görüldüğü üzere basınç dayanım testleri için laboratuvar tipi beton presi kullanılmıştır. Geopolimer betonlarda, basınç dayanım testinde üç örneğin ortalaması alınmıştır ve 7 günlük numuneler kullanılmıştır.

Ultrasen deneyleri ASTM C 597 (2009)’a göre yapılmıştır. Geopolimer betonlar fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 24 saat boyunca Resim 3.13’deki su tankına yerleştirilmiştir. Örneklerin Arşimet prensibine göre su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Geopolimer malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında; örnekler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları ve suya doymun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiş ve ultrasen deneyi yapılmıştır (Resim 3.12). Ardından ilgili örnekler etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulup tekrar tartılmıştır. Elde edilen bu değerler yardımıyla örneklerin; görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri (TS EN 197-1 2009)’a göre, su emme değerleri ise (TS EN 771-1 2005)’e göre belirlenmiştir. Geopolimer betonların mekanik özellikleri ise (TS EN 12390-3 2010)’a göre belirlenmiştir.



**Resim 3.11** Beton presi.



**Resim 3.12** Ultra ses deneyi.



**Resim 3.13** Beton örneklerinin konulduğu su tankı.

### 3.4.1 Su Emme

Betonların ağırlıkça emmiş olduğu su yüzdesini belirtir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$S_a = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad (3.1)$$

S<sub>a</sub>: Ağırlıkça emilen su emme miktarı (%)

P<sub>2</sub>: Su emdirilmiş ağırlık (gr),

P<sub>1</sub>: Kuru ağırlık (gr).

### 3.4.2 Görünen Porozite

Malzemedeki gözeneklilik oranına porozite adı verilir. Porozitenin hesaplanmasında aşağıda verilen formül kullanılır.

$$P = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (3.2)$$

P: Görünen porozite (%)

W<sub>1</sub>: Numunenin etüv kuru ağırlığı (gr),

W<sub>2</sub>: Numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W<sub>3</sub>: Numunenin havadaki ağırlığı (gr).

### 3.4.3 Bulk Yoğunluk

Malzemenin birim hacminin ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$Bd = \frac{W_1}{(W_3 - W_2)} \quad (3.3)$$

Bd: Hacim ağırlığı (Bulk Yoğunluk)

W<sub>1</sub>: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

W<sub>2</sub>: Numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W<sub>3</sub>: Numunenin havadaki ağırlığı (gr).

### 3.4.4 Birim Hacim Ağırlık

$$D_h = \frac{M_k}{V_h} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.4)$$

Dh: Birim hacim ağırlığı (kg/m<sup>3</sup>),

Mk: Etüv Kurusu Ağırlığı (kg),

Vh: Numunenin (Delikleri Dahil) hacmi (dm<sup>3</sup>).

### 3.4.5 Görünür Yoğunluk

$$Gr.Y. = \frac{W_1}{(W_1 - W_2)} \quad (3.5)$$

W<sub>1</sub>: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

W<sub>2</sub>: Numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W<sub>3</sub>: Numunenin havadaki ağırlığı (gr).

### 3.4.6 Basınç Mukavemet Testi

$$fb = \frac{Pk}{A_0} \text{ (MPa)} \quad (3.6)$$

Fb: Basınç mukavemeti (N)

A<sub>0</sub>: Basınç uygulanan alan (mm<sup>2</sup>)

P<sub>k</sub>: Kırılma anındaki yük (N)

k: Numunenin biçim katsayısı (k=1)

Numunelerin mekanik özelliklerinden biri olan basınç mukavemet testleri de tüm numunelere uygulanarak numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir.

### 3.5 Geopolimer Betonların Mineralojik ve Morfolojik Analizleri

Çizelge 3.4'e uygun olarak hazırlanan A5-24, A3-5, B5-24 ve B3-5 kodlu beton örneklerinden analizleri yapılmak üzere numuneler alınmıştır. AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde Bruker Marka D 8 Advance Model cihazıyla (Resim 3.5) beton örneklerin XRD analizleri yapılmıştır. Yine aynı merkezde bulunan ve Resim 3.15'de gösterilen LEO 1430 VP model SEM cihazı ile de morfolojik analizler yapılmış ve örneklerin iç yapı resimleri çekilmiştir.



**Resim 3.14** SEM cihazı.

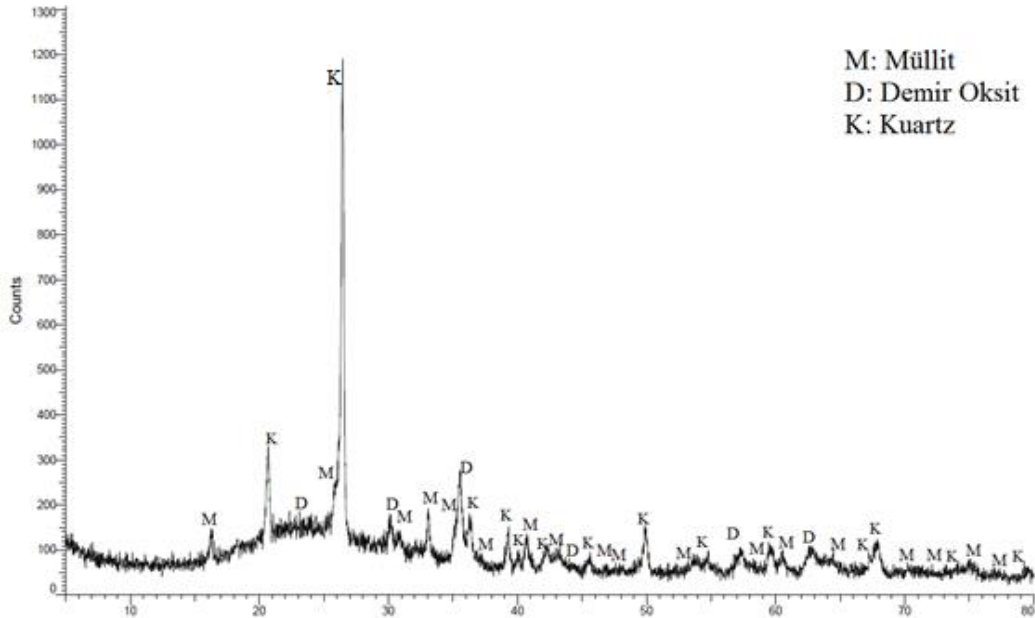
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Malzemelerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

XRF analiz sonuçlarına göre; uçucu külün toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri % 86.58, CaO değeri ise % 3.09'dur. Bu veriler ışığında kullandığımız uçucu kül ASTM C618-08a'ya göre (ASTM C 618 2000), toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  değeri % 70'den fazla ve CaO % 10'dan az olduğu için F sınıfı uçucu küldür. Uçucu külden kütlece silika/alümina oranı ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 2.61'dir (Çizelge 4.1). Uçucu külün X-ışınları difraksiyon grafiğine (XRD) göre uçucu külden; kuvars, mullit ve demir oksit gibi mineraller bulunmaktadır (Çizelge 4.1). Lazer tane boyutu analizine göre, uçucu küle ait lazer tane boyut analiz değerleri Çizelge 4.2'de verilmiş olup, uçucu külün yoğunluğu  $2.01 \text{ gr/cm}^3$ , BET yüzey alanı ise  $10.528 \text{ m}^2/\text{gr}$ 'dir.

Çizelge 4.1 Uçucu külün kimyasal kompozisyonu.

Kompozisyon	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	CaO	LOI	Toplam
Ağırlıkça, %	55.63	21.34	9.61	4.49	0.16	1.87	0.64	3.09	1.03	97.86



Şekil 4.1 Tunçbilek uçucu külünün XRD difraktogramı.

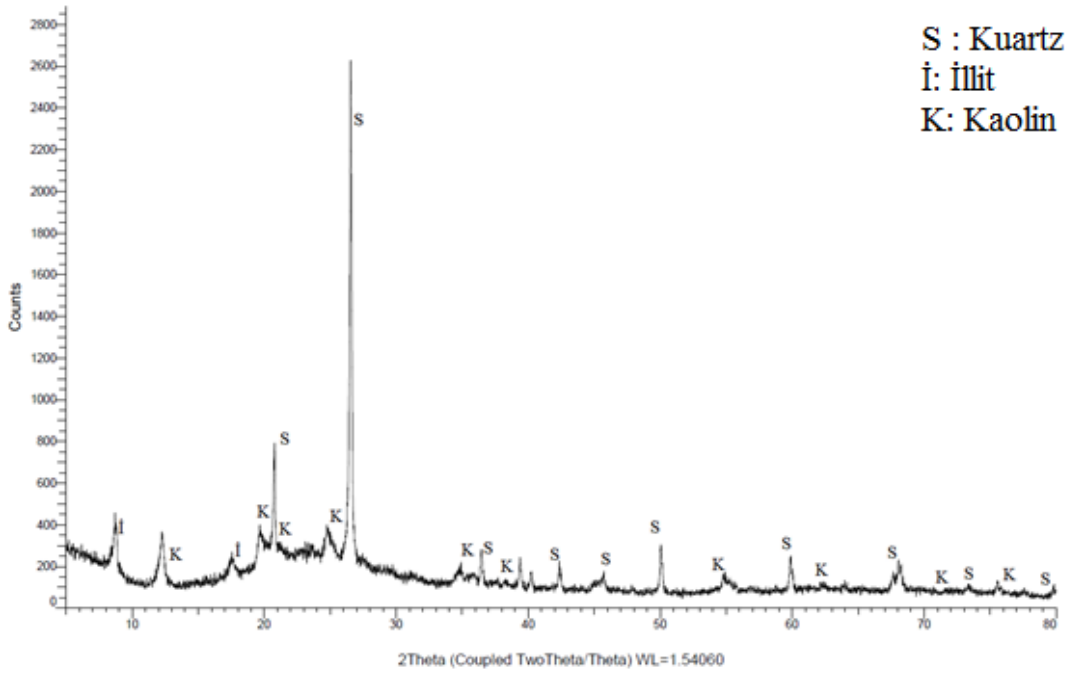
**Çizelge 4.2** Uçucu küle ait lazer tane boyut analiz değerleri.

Numune	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)
Uçucu kül	7.122	37.375	139.115

XRF analizlerine göre MK'da % 54.76 SiO<sub>2</sub> ve %37.71 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunmaktadır. Metakaolinin XRD analizinden elde edilen verilere göre MK'da; kuvars, illit ve kaolin gibi mineraller (Şekil 4.2) bulunmaktadır. Bununla birlikte MK'nın yoğunluğu 2.69 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te MK'nın XRF analiz sonuçlarına göre kimyasal kompozisyonu ve lazer tane boyut analiz değerleri yer almaktadır.

**Çizelge 4.3** Metakaolinin kimyasal kompozisyonu.

Kompozisyon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	LOI	Toplam
Ağırlıkça, %	54.76	37.71	0.89	0.28	0.20	1.35	0.04	0.46	2.87	98.56



**Şekil 4.2** Metakoline ait XRD difraktogramı.

**Çizelge 4.4** Metakaoline ait lazer tane boyut analiz değerleri.

Numune	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)
Metakaolin	1.724	8.796	75.593

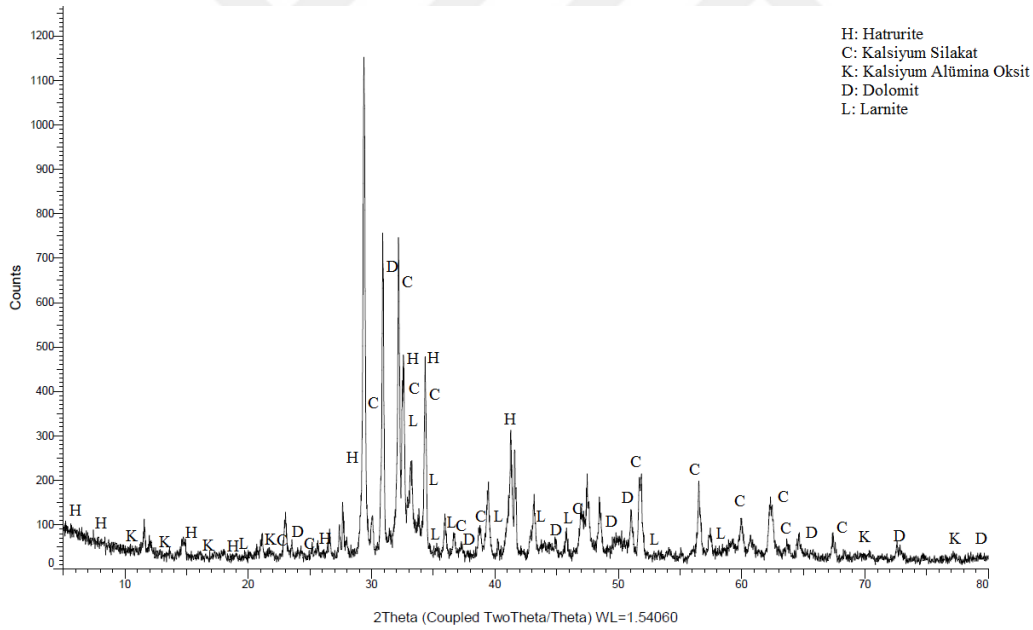
Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentonun XRD analiz sonuçlarına göre kimyasal kompozisyonu ve lazer tane boyut analiz değerleri yer almaktadır. Çimento malzemesinde yapılan XRD analizine göre, malzeme bünyesinde; dolomit, larnit, kalsiyum alüminyum oksit ve kalsiyum silikat gibi mineraller bulunmaktadır (Şekil 4.3).

**Çizelge 4.5** CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentonun kimyasal kompozisyonu.

Kompozisyon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	LOI	Toplam
Ağırlıkça, %	14.52	4.08	2.07	3.53	0.61	1.12	3.57	56.6	13.23	99.33

**Çizelge 4.6** CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentoaya ait lazer tane boyut analiz değerleri.

Numune	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)
Çimento	1.913	17.322	53.956

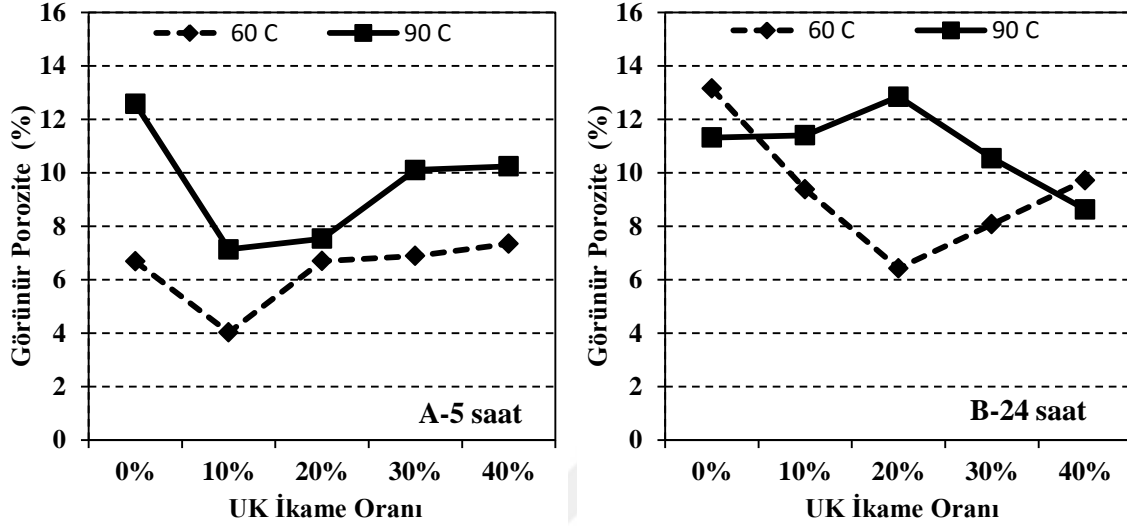


**Şekil 4.3** CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R tipi çimentoaya ait XRD difraktogramı.

## 4.2 Geopolimer Betonların Fiziksel Özellikleri

Çalışmada hazırlanan geopolimer betonların fiziksel özellikleri birbirinden farklı sonuçlar vermiş ve uygulanan kür sıcaklıklarına göre farklı grafiklere ayrılmıştır. Buna

göre A grafiğinde 5 saat kür edilen örneklere ait veriler sunulurken, B grafiğinde 24 saat kür edilen örneklere ait veriler yer almıştır.



Şekil 4.4 Geopolimer betonların görünür porozite oranları.

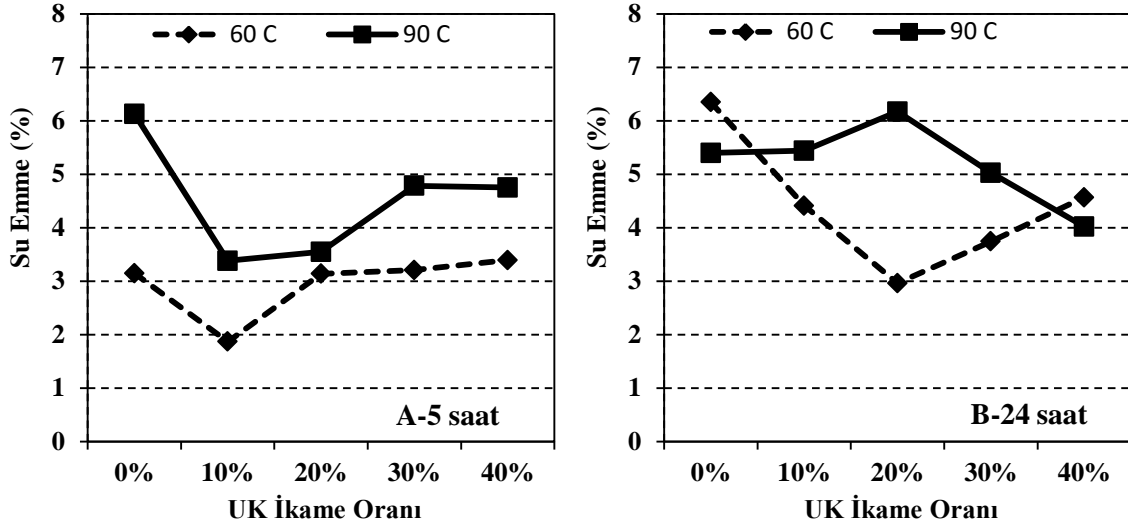
60 °C'de kür edilen örneklerde, uygulanan kür sürelerindeki artışların geopolimer betonlarda görünen poroziteyi arttırdığı tespit edilmiştir. Metakaolin esaslı geopolimer betonlarda ikame edilen UK miktarının artması ile kür süreleri arasında değişken sonuçlar alınmıştır. Örneklerin 5 saat kür edildiği durumlarda UK ikameli beton örneklerinde artan UK ikame oranı ile birlikte geopolimer betonların görünen porozite oranları artmıştır. Bununla birlikte UK ikamesinin olmadığı örnekler ile UK ikameli örnekler arasında çok büyük farklılıklar oluşmadığı da gözlenmiştir. 60 °C'de 5 saat kür edilen örneklerde görünen porozite oranları % 4 - % 7.3 arasında değişmiş ve en düşük porozite oranı % 10 UK ikameli B2-5 örneklerinden elde edilmiştir (Şekil 4.4 (A)).

Geopolimer betonların 60 °C ve 24 saat kür edilen örneklerinde ise UK ikame oranının % 20'ye kadar yapıldığı örneklerde görünen poroziteler azalmıştır. % 30 UK ikamesi ile birlikte ise örneklerin görünen porozitelerinde tekrar bir artış gerçekleşmiştir. 5 saat kür edilen örnekler ile kıyaslandığında porozitedeki farklılıkların örnek bünyelerinde gerçekleşen geopolimerleşme ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Nitekim teorikte örneklere uygulanan kür süresinin arttırılması ile geopolimerleşmenin artması ve dolayısıyla bünyede daha gözenekli bir yapı oluşması beklenmektedir. 24 saat kür

edilen örneklerde en yüksek porozite oranına %13.2 ile % 100 MK içerikli geopolimer betonlarda ulaşılrken, en düşük porozite oranları % 6.4 ile % 20 UK ikameli geopolimer betonlardan elde edilmiştir (Şekil 4.4 (B)).

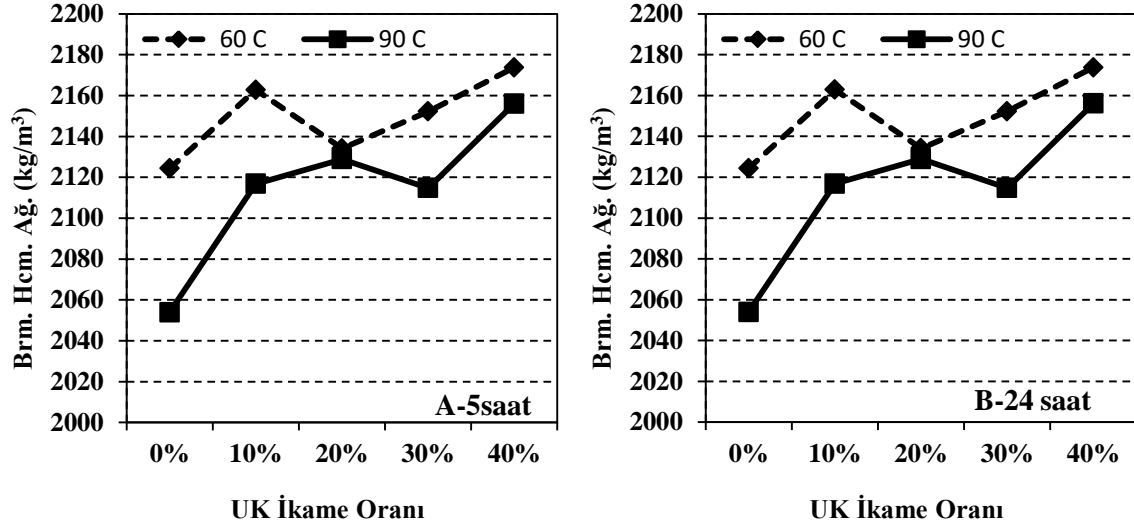
Geopolimer betonların 90 °C’de kür edilen örnekleri incelendiğinde ise genel anlamda görünen porozite oranlarında artışlar olduğu gözlenmiştir. Bu aşamada 5 saatlik kür uygulanan örneklerde UK ikamesi arttıkça porozitenin doğrusal arttığı belirlenmiştir. UK ikamesinin olmadığı örneklerde ise en yüksek gözeneklilik oranına ulaşılmıştır. 90 °C’de 5 saat kür edilen örneklerde görünen porozite oranları % 7.1 - % 12.6 arasındadır (Şekil 4.4 (A)). Aynı betonların 24 saat kür edilen örneklerinde ise UK ikame oranındaki artışların görünen porozite oranları üzerindeki etkisinin değişken olduğu gözlenmiştir. % 20 UK ikamesine kadar örneklerin porozite oranlarının arttığı gözlenirken, % 30 ve % 40 UK ikameli betonlarda porozite oranları azalmıştır. Bununla birlikte 90 °C’de 24 saat kür edilen geopolimer betonların görünen porozitesi % 8.6 - % 12.8 arasında değişkenlik göstermiştir.

Geopolimer betonların 60 °C’de 5 saat kür edilen örneklerinde, su emme oranları % 1.9 - % 3.4 arasında değişkenlik göstermiştir. Su emme oranları % 20 UK ikamesi ve üzerindeki oranlarda lineer olarak artmıştır. En düşük su emme oranları % 10 UK ikameli örneklerde elde edilirken, en yüksek oranları % 40 UK ikameli örneklerde elde edilmiştir. Kür süresinin daha uzun olarak uygulandığı örneklerde ise su emme oranları artış göstermiştir. Bununla birlikte UK ikamesi ile su emme oranları arasında lineer bir ilişki görülmemiştir. Bu örneklerde en yüksek su emme oranları % 100 MK’lı betonlarda elde edilirken (% 6.3), en düşük su emme oranları % 20 UK ikameli örneklerde elde edilmiştir (% 3). 60 °C’de kür edilen geopolimer betonların su emme oranları incelendiğinde örneklere uygulanan kür süresinin artması ile betonların su emme oranlarının arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.5 (A) ve (B)).



Şekil 4.5 Geopolimer betonların su emme oranları.

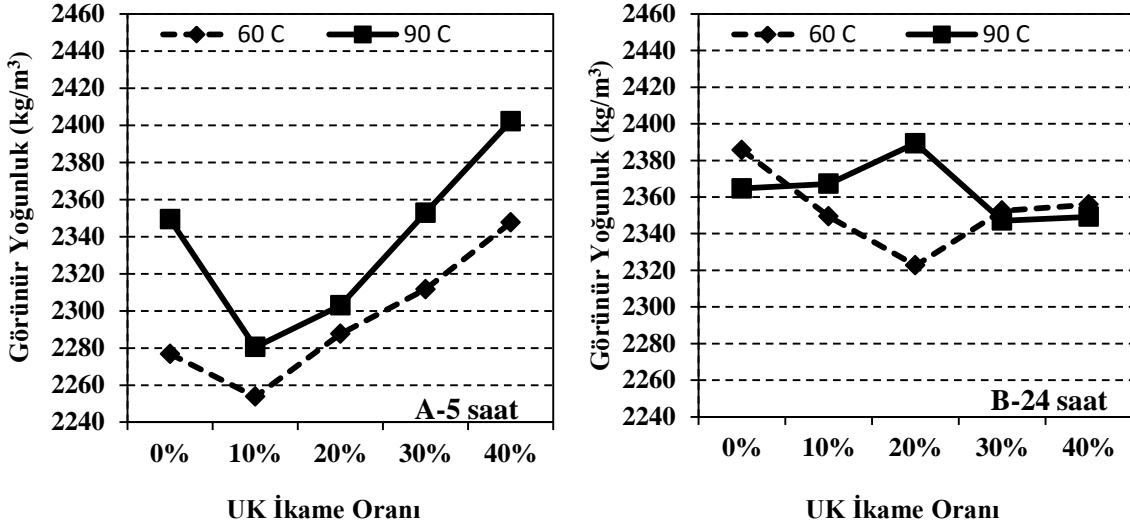
Geopolimer betonların kür sıcaklıklarının artırılması durumunda ise su emme oranlarının genel anlamda artış gösterdiği görülmüştür. Bu artışların bünye içerisinde artan sıcaklıkla birlikte alkali solüsyonun daha hızlı bir şekilde buharlaşmaya sebep olduğu ve aynı zamanda bu hızlı buharlaşma ile örneklerde kılcal çatlakların bir miktar daha artması neticesinde değerlerin arttığı düşünülmektedir. 90 °C’de kür edilen geopolimer betonlarda 5 saat kür edilen örneklerde su emme oranları % 3.4 - % 6.1 arasında değişkenlik göstermiştir. En düşük su emme oranları % 10 UK ikamesi bulunan örneklerde elde edilmiştir. Aynı sıcaklıkta 24 saat kür edilen örneklerde ise su emme oranları % 4.0 - % 6.2 arasındadır. Bu örnekler içerisinde ise en düşük su emme oranları % 40 UK ikameli geopolimer betonlarda elde edilmiştir (Şekil 4.5 (A) ve (B)).



Şekil 4.6 Geopolimer betonların birim hacim ağırlığı.

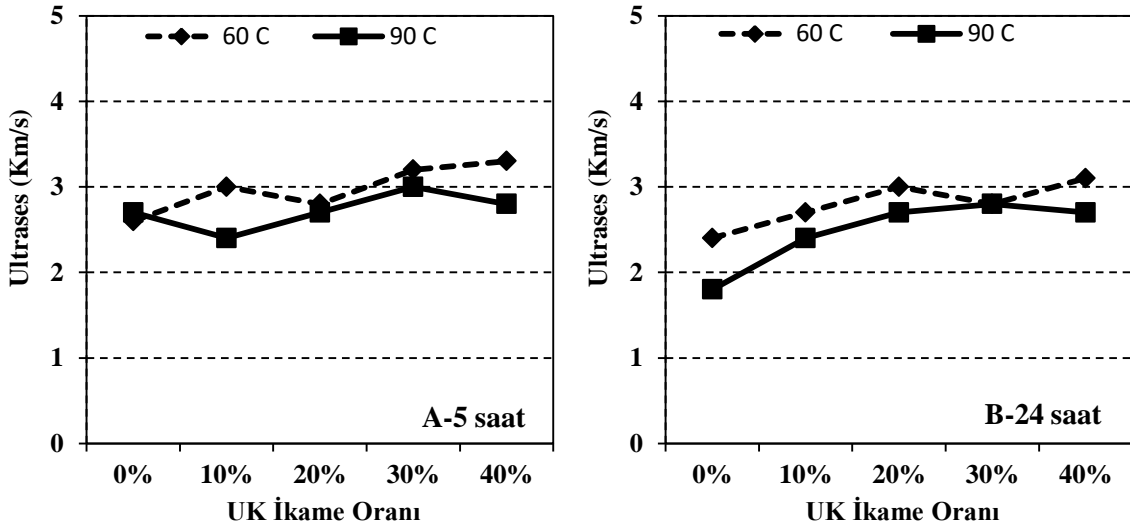
Beton numunelerinin yoğunluk durumlarının yorumlanmasında birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla bu iki yoğunluk kavramının bir arada değerlendirilmesi daha faydalıdır. 60 °C’de kür edilen örneklerin 90 °C’de kür edilen örneklere göre daha yoğun bir yapıda olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6). 60 ve 90 °C’de kür edilen geopolimer betonların birim hacim ağırlıklarına UK ikamesinin doğrusal azalan bir etki yapmadığı gözlenmiştir. Normal şartlarda kullanılan malzemelerin özgül ağırlık değerleri dikkate alındığında bünyede artan UK ikame oranı ile betonların birim hacim ağırlıklarının doğrusal olarak azalması beklenmektedir. Fakat örneklerin üretimi sırasında tüm numuneler homojen bir biçimde hazırlanamadığı gerekçesiyle birim hacim ağırlık değerlerinin değişken olduğu düşünülmektedir. Bu noktada, örneklerin üretiminde kullanılan metakaolin hammaddesinin kohezyonlu özelliğinden dolayı yerleştirme ve sıkıştırılarda bazı zorluklar yaşanmış ve sıkıştırma işleminin homojen gerçekleştirilememesi sebebiyle değerlerin değişken çıktığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.6 incelendiğinde % 100 MK içerikli betonların en düşük birim hacim ağırlıklara sahip olduğu görülebilmektedir.

Geopolimer betonların 60 °C’de kür edilen örneklerinde birim hacim ağırlıklar 2071.9 kg/m<sup>3</sup> – 2173.7 kg/m<sup>3</sup>; 90 °C’de kür edilen örneklerde ise 2053.9 kg/m<sup>3</sup> – 2156.1 kg/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik göstermiştir.



Şekil 4.7 Geopolimer betonların görünür yoğunlukları.

Geopolimer betonların görünür yoğunlukları Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Numunelerde hem 60 °C hem de 90 °C’de kür süreleri arttıkça görünür yoğunluk değerlerinin arttığı gözlenmiştir. 5 saat kür edilen UK ikameli geopolimer betonlarda UK ikamesinin artması ile birlikte görünür yoğunlukların arttığı da tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 60 ve 90 °C’de kür edilen numunelerin görünür yoğunlukları sırasıyla; 2253.7 – 2385.7 kg/m<sup>3</sup> ve 2280.4 – 2402.1 kg/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik göstermiştir.



Şekil 4.8 Geopolimer beton numunelerinin ortalama ultras ses hız değerleri.

Numunelerin ultras ses geçiş hız değerlerine ait deney sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir. Malzemenin içerisinde geçen P dalgasının hızı ile malzeme dayanımı arasında

doğrudan bir ilişki yoktur (Binici *et al.* 2009). Ancak, P dalgasının hızı ile geopolimerin yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan geopolimerde, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir geopolimerde, P dalgasının geopolimerin bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Yada geopolimer içerisindeki boşluk miktarı arttıkça P dalgasının hızı daha küçük olmaktadır.

Şekil 4.8 incelendiğinde; ortalama olarak hem 60 °C hem 90 °C'de kür süresi arttıkça geopolimer betonların ultra ses geçiş hızları azalmıştır. Bununla birlikte, geopolimer betonların hazırlanmasında kullanılan UK ikame oranı artışıyla örneklerde ultrases geçiş hızının arttığı ve düşük sıcaklıklarda kür edilen örneklerde daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Geopolimer betonların ultrases hızı değerleri 1.8 km/sn – 3.3 km/sn arasında değişmiştir.

### **4.3 Geopolimer Betonların Basınç Dayanım Özellikleri**

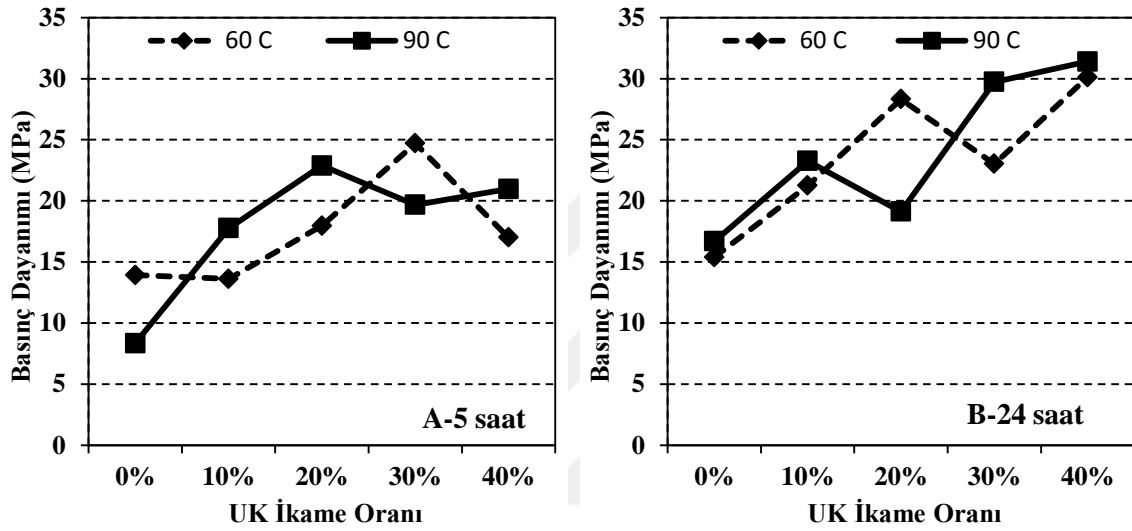
Kür sıcaklığının artırılmasıyla örneklerin kısa zaman periyotları için daha yüksek dayanım kazanması sağlanabilir (De Vargas *et al.* 2011). Yapılan araştırmalarda kür süreleri ve alkali iyonlarında bulunan silika ve alümina arasında gerçekleşen reaksiyonlarda numune dayanımları artan bir davranış sergilemiştir (Somna *et al.* 2011).

Geopolimer betonlardan elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde uygulanan kür sıcaklığının ve süresinin artması ile birlikte örnek dayanımlarında artışlar olduğu gözlenmiştir. Genel anlamda bünyeye eklenen UK ikamesi ile örneklerin basınç dayanımları artmıştır. Bu artışlarda ikame olarak eklenen UK miktarının artmasıyla örneklerin daha iyi sıkıştırıldığı ve daha iyi bir şekillendirme yapılabilmesi neticesinde dayanımlarda artışlar gerçekleşmiştir. Aynı zamanda metakaolin ve UK malzemelerinin birarada bulunmaları neticesinde örnek bünyesinde daha iyi bir geopolimerizasyon oluşmuş ve bunun neticesinde geopolimer beton örneklerinin dayanımları artış göstermiştir.

Şekil 4.9 (A) ve (B) incelendiğinde 60 °C'de 5 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları 13.6 MPa – 24.7 MPa; 24 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları ise 15.4 MPa – 30.1 MPa arasındadır. Bu sıcaklıkta kür edilen örnekler içerisinde en

yüksek basınç dayanımı 24 saat kür edilen % 40 UK ikameli örneklerde elde edilmiştir.

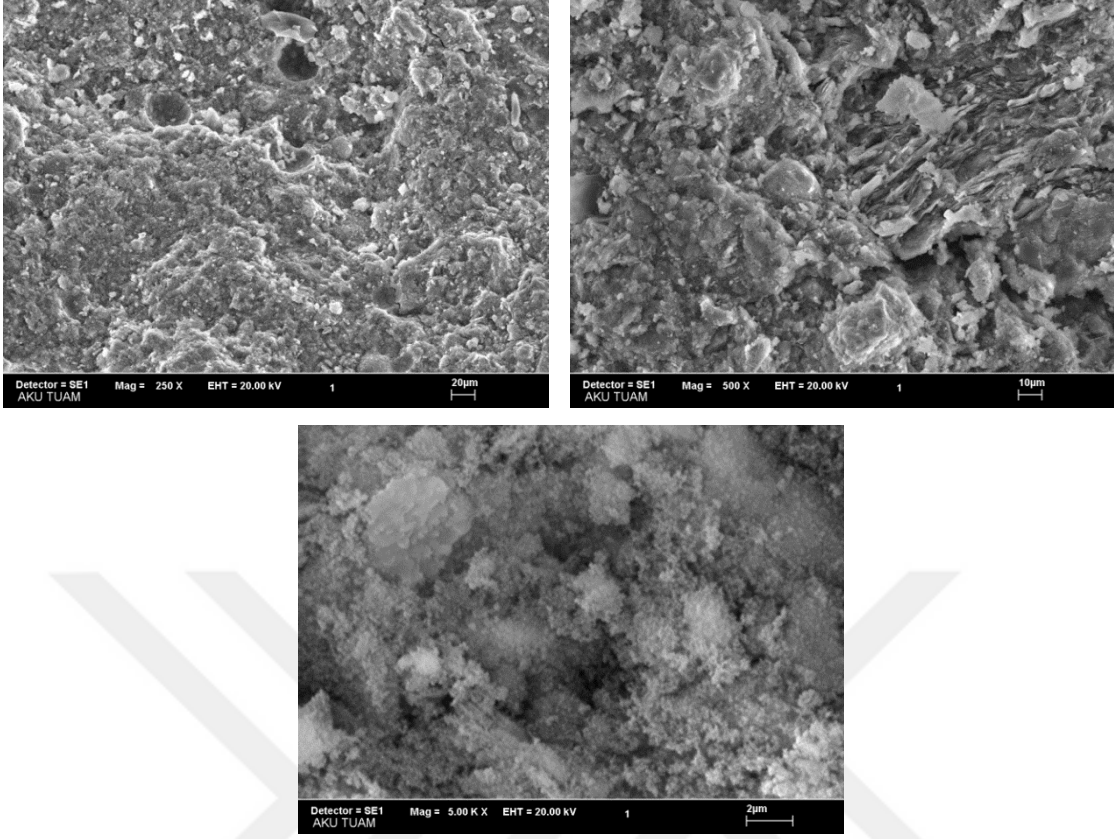
90 °C’de 5 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları 8.3 MPa – 22.9 MPa; 24 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları ise 16.7 MPa – 31.4 MPa arasındadır. Bu sıcaklıkta kür edilen örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı yine 24 saat kür edilen % 40 UK ikameli örneklerde elde edilmiştir.



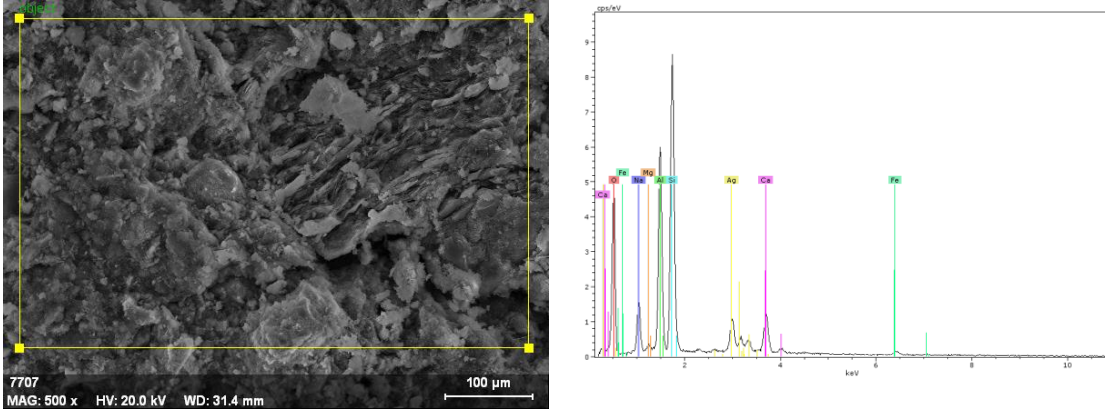
Şekil 4.9 Geopolimer beton numunelerinin basınç değerleri.

#### 4.4 SEM-EDX Analizleri

Geopolimer betonlardan seçilen bazı örnekler üzerinde SEM-EDX analizleri uygulanmış ve ilgili örneklerin morfolojik özellikleri ile içerdikleri bileşikler araştırılmıştır. Bu kapsamda % 20 ve % 40 UK ikameli örneklerin incelemeleri yapılmıştır. Geopolimer betonlardan % 20 UK ikameli olan ve 60 °C’de 5 saat süre ile kür edilen örneklere ait SEM resimleri Resim 4.1’de, aynı örneklerin 90 °C’de 5 saat kür edilen örnekleri ise Resim 4.3’de gösterilmiştir. Bu örneklerin SEM görüntüleri incelendiğinde iç yapıların birbirine benzer olduğu gözlenmiştir.



**Resim 4.1** B3-5 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x500 büyütme).

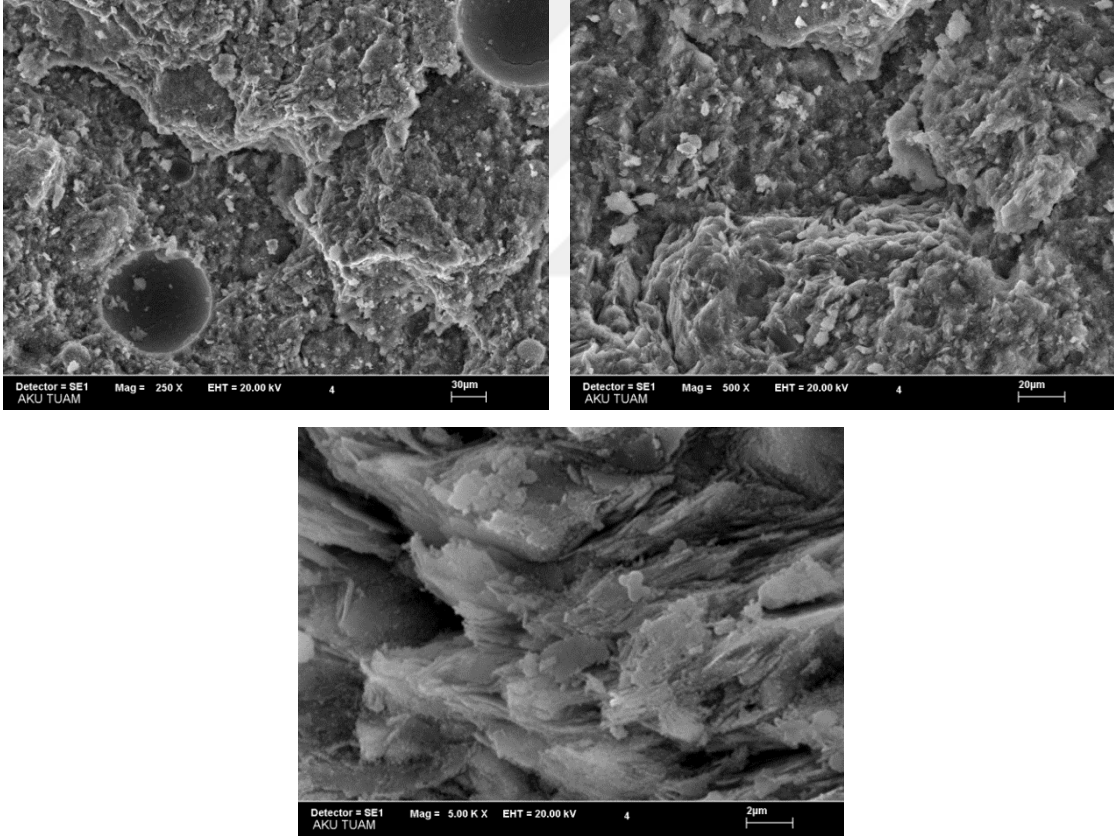


**Resim 4.2** B3-5 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.

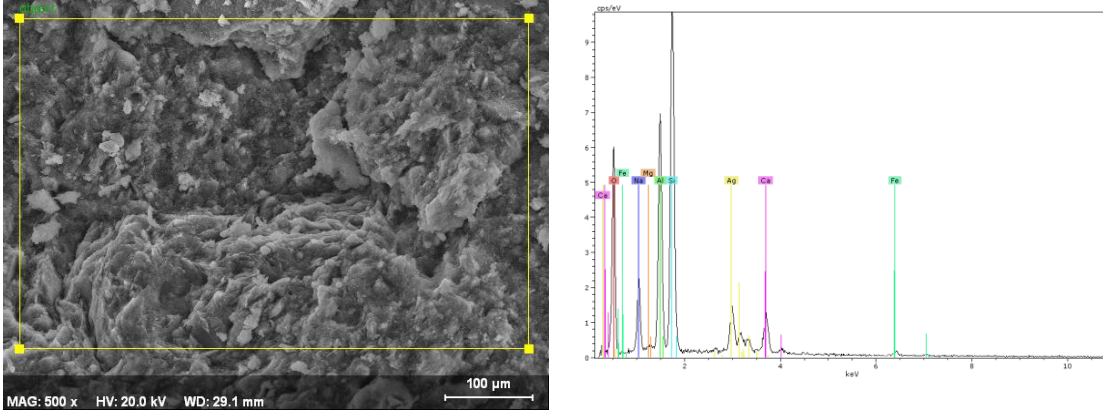
**Çizelge 4.7** B3-5 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Sodyum	K serisi	5767	4.41	4.94	4.18	Na <sub>2</sub> O	8.59
Magnezyum	K serisi	509	0.27	0.31	0.25	MgO	0.40
Alüminyum	K serisi	24752	10.78	12.07	8.69	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.43
Silis	K serisi	38828	17.23	19.29	13.35	SiO <sub>2</sub>	53.28
Kalsiyum	K serisi	6804	2.96	3.31	1.61	CaO	5.98
Demir	K serisi	1036	1.12	1.26	0.44	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.32
Oksijen	K serisi	17589	52.54	58.83	71.48		27.38

SEM – EDX analizlerine göre 60 ve 90 °C’de 5 saat kür edilen örneklerin bünyesinde; silis, magnezyum, alüminyum, sodyum, kalsiyum, demir ve oksijen minerallerinin varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.7 – 4.8 ve Resim 4.2 – Resim 4.4).



**Resim 4.3** A3-5 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x5000 büyütme).



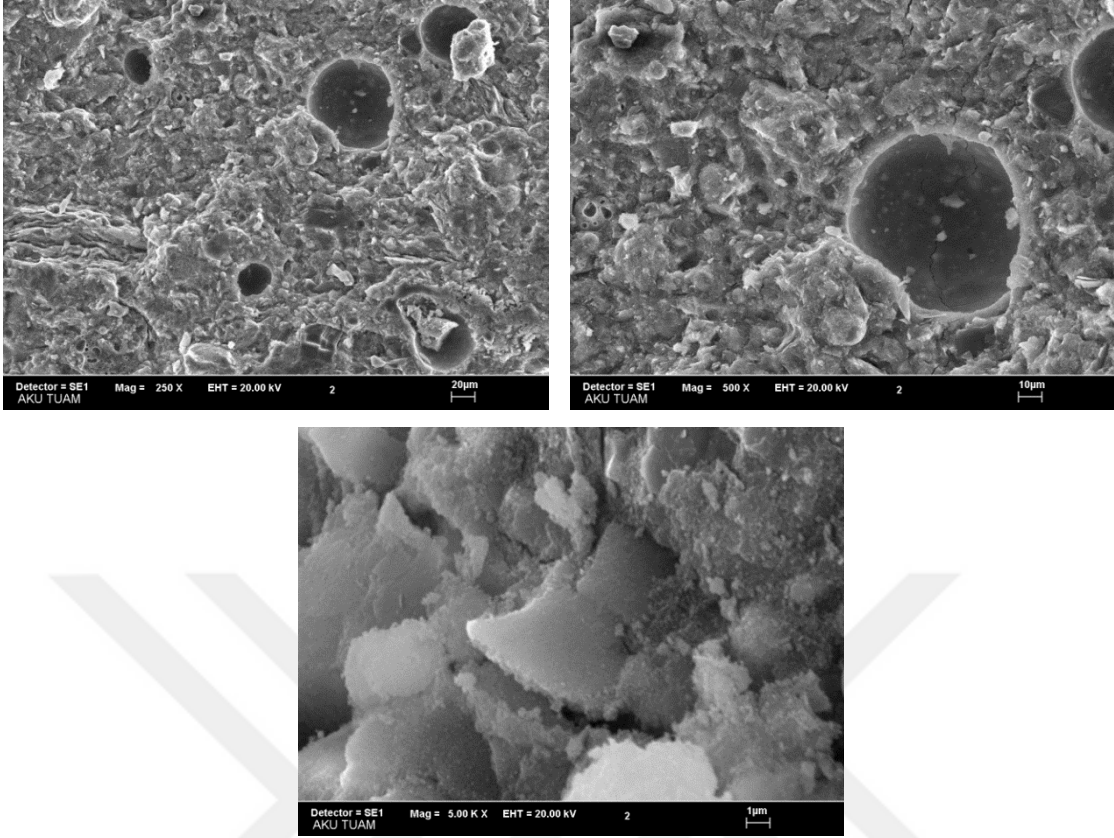
**Resim 4.4** A3-5 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.

**Çizelge 4.8** A3-5 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları.

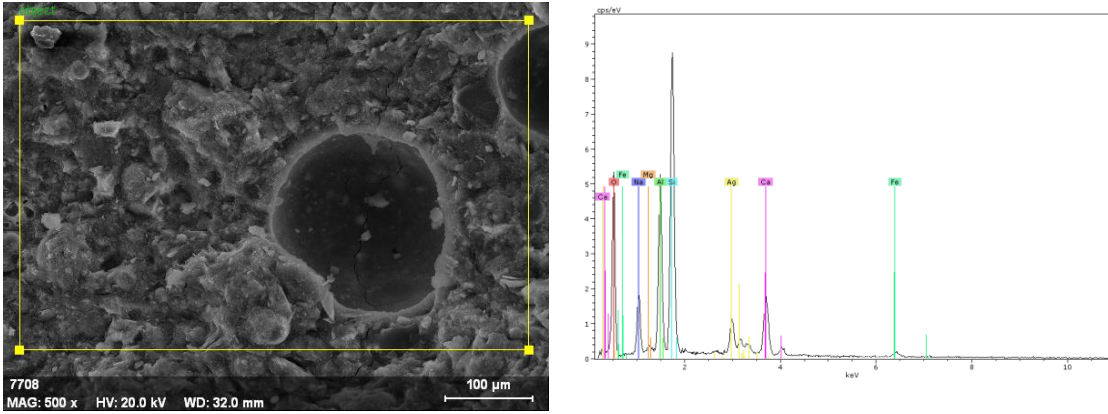
Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Sodyum	K serisi	4166	5.49	5.89	5.02	Na <sub>2</sub> O	9.80
Magnezyum	K serisi	400	0.38	0.41	0.33	MgO	0.50
Alüminyum	K serisi	15103	11.57	12.41	9.01	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.94
Silis	K serisi	23894	18.75	20.10	14.03	SiO <sub>2</sub>	53.10
Kalsiyum	K serisi	3942	3.21	3.44	1.68	CaO	5.94
Demir	K serisi	494	0.91	0.97	0.34	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.71
Oksijen	K serisi	11020	52.95	56.78	69.58		23.29

Geopolimer betonların 60 ve 90 °C’de 24 saat kür edilen örneklerine ait SEM resimleri Resim 4.5 ve Resim 4.7’de gösterilmiştir. Aynı örneklerin 5 saat kür edilen örnekleri ile kıyaslandığında iç yapının diğer örneklerle çok farklı olmadığı ve tüm örneklerde kullanılan uçucu küllerin rekasiyona girdiği ve bu nedenle SEM görüntülerinde gözlenemediği düşünülmektedir.

SEM – EDX analizlerine göre 60 ve 90 °C’de 24 saat kür edilen örneklerin bünyesinde de; silis, magnezyum, alüminyum, sodyum, kalsiyum, demir ve oksijen minerallerinin varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.9 – 4.10 ve Resim 4.6 – Resim 4.8).



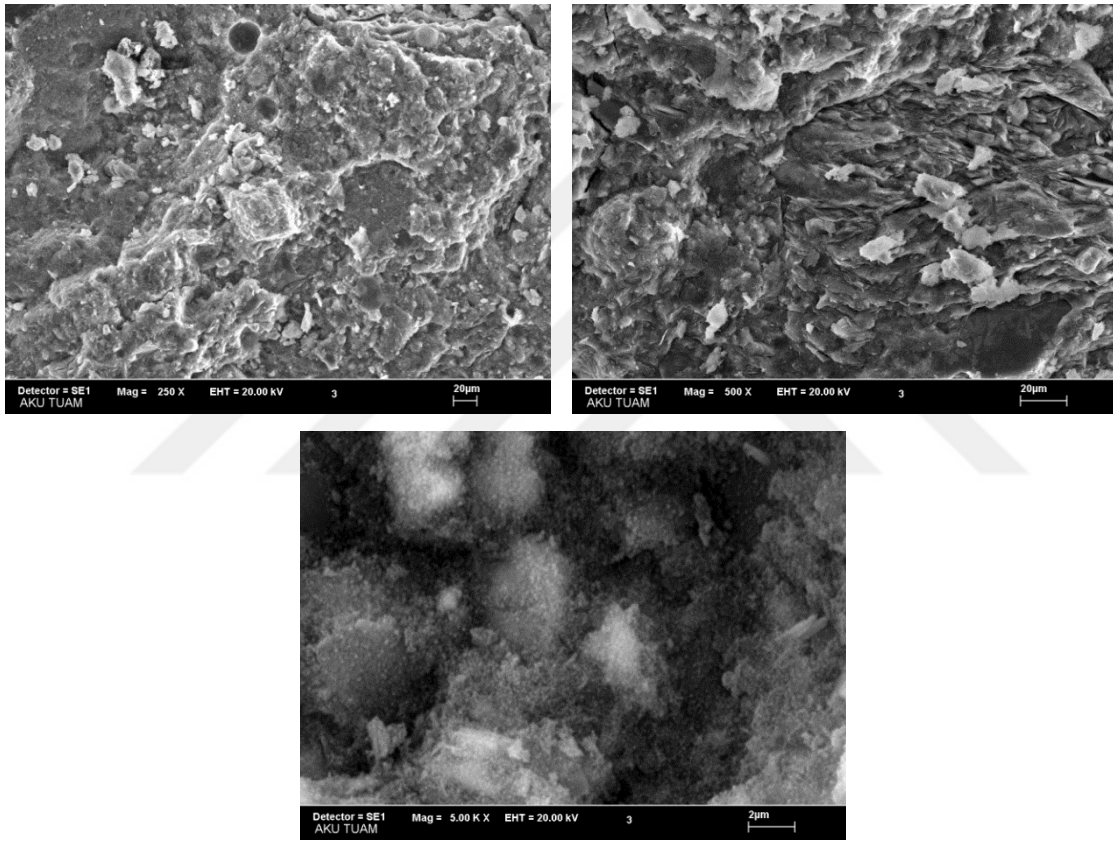
**Resim 4.5** B5-24 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x500 büyütme).



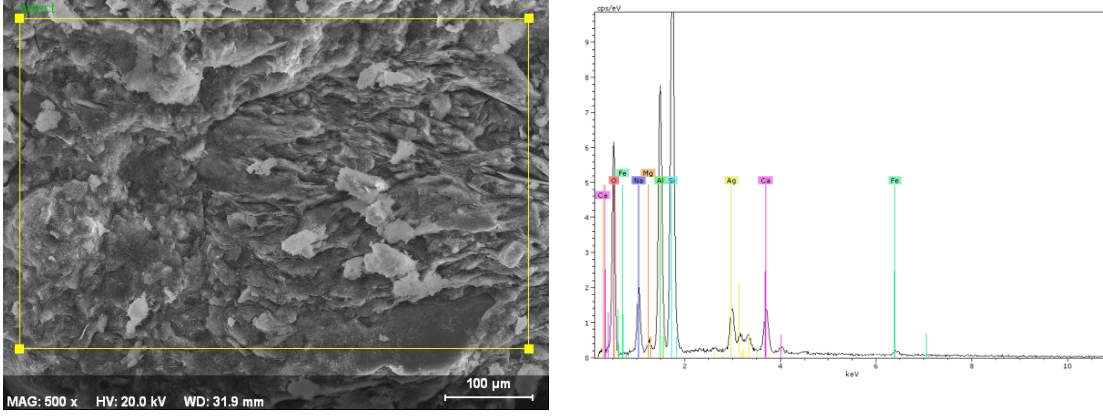
**Resim 4.6** B5-24 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.

**Çizelge 4.9** B5-24 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Sodyum	K serisi	4938	5.34	5.74	4.91	Na <sub>2</sub> O	9.92
Magnezyum	K serisi	706	0.54	0.58	0.47	MgO	0.75
Alüminyum	K serisi	15529	9.64	10.36	7.55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.07
Silis	K serisi	28565	17.61	18.93	13.25	SiO <sub>2</sub>	51.87
Kalsiyum	K serisi	7809	4.97	5.34	2.62	CaO	9.58
Demir	K serisi	918	1.43	1.53	0.54	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.81
Oksijen	K serisi	13195	53.50	57.51	70.66		26.95



**Resim 4.7** A5-24 kodlu geopolimer betonun SEM görüntüsü (x250, x500, x5000 büyütme).



**Resim 4.8** A5-24 kodlu geopolimer betonun SEM-EDX grafiği.

**Çizelge 4.10** A5-24 kodlu geopolimer betonun EDX analizi sonuçları.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Sodyum	K serisi	3834	4.44	4.89	4.17	Na <sub>2</sub> O	8.07
Magnezyum	K serisi	361	0.30	0.33	0.26	MgO	0.40
Alüminyum	K serisi	17627	11.74	12.90	9.38	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.88
Silis	K serisi	27372	18.84	20.71	14.47	SiO <sub>2</sub>	54.29
Kalsiyum	K serisi	4286	2.84	3.12	1.53	CaO	5.35
Demir	K serisi	670	1.04	1.15	0.40	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.01
Oksijen	K serisi	11616	51.77	56.91	69.79		22.57

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, UK ve MK malzemeleri ve alkali aktivatörler (NaOH ve SS) ile üretilen geopolimer betonlara termal kür prosesinin uygulanabilmesi amacıyla farklı süre (5 ve 24 saat) ve sıcaklıklarda (60 ve 90 °C) kür işlemi uygulanmıştır. Kür işlemi uygulanan örneklere fiziksel ve mekaniksel testler yapılmış ayrıca SEM-EDX analizleri uygulanmıştır.

Geopolimer betonlardan 60 °C'de kür edilen örneklerde, uygulanan kür sürelerindeki artışların görünen poroziteyi arttırdığı tespit edilmiştir. Örneklerin 5 saat kür edildiği durumlarda UK ikameli beton örneklerinde artan UK ikame oranı ile birlikte geopolimer betonların görünen porozite oranları artmıştır. Bununla birlikte UK ikamesinin olmadığı örnekler ile UK ikameli örnekler arasında çok büyük farklılıklar oluşmadığı gözlenmiştir. Geopolimer betonların 60 °C ve 24 saat kür edilen örneklerinde ise UK ikame oranının % 20'ye kadar yapıldığı örneklerde görünen poroziteler azalmıştır. % 30 UK ikamesi ile birlikte ise örneklerin görünen porozitelerinde tekrar bir artış gerçekleşmiştir. 5 saat kür edilen örnekler ile kıyaslandığında porozitedeki farklılıkların örnek bünyelerinde gerçekleşen geopolimerleşme mekanizması ile alakalı olduğu düşünülmektedir.

Geopolimer betonların 90 °C'de kür edilen örnekleri incelendiğinde ise genel anlamda görünen porozite oranlarında artışlar olduğu gözlenmiştir. Bu aşamada 5 saatlik kür uygulanan örneklerde UK ikamesi arttıkça porozitenin doğrusal arttığı belirlenmiştir. Aynı betonların 24 saat kür edilen örneklerinde ise UK ikame oranındaki artışların görünen porozite oranları üzerindeki etkisinin değişken olduğu gözlenmiştir. % 20 UK ikamesine kadar örneklerin porozite oranlarının arttığı gözlenirken, % 30 ve % 40 UK ikameli betonlarda porozite oranları azalmıştır. Örneklerin görünen porozite oranları % 4-% 13.2 arasında değişkenlik göstermiştir.

Geopolimer betonların 60 °C'de 5 saat kür edilen örneklerinde, su emme oranları % 1.9-%3.4 arasında değişkenlik göstermiştir. Su emme oranları % 20 UK ikamesi ve üzerindeki oranlarda lineer olarak artmıştır.

Geopolimer betonların kür sıcaklıklarının arttırılması durumunda ise su emme oranlarının genel anlamda artış gösterdiği görülmüştür. Bu artışların bünye içerisinde artan sıcaklıkla birlikte alkali solüsyonun daha hızlı bir şekilde buharlaşmaya sebep olduğu ve aynı zamanda bu hızlı buharlaşma ile örneklerde kılcal çatlakların bir miktar daha artması neticesinde değerlerin arttığı düşünülmektedir.

60 ve 90 °C’de kür edilen geopolimer betonların birim hacim ağırlıklarına UK ikamesinin doğrusal bir etki yapmadığı gözlenmiştir. Geopolimer betonların 60 °C’de kür edilen örneklerinde birim hacim ağırlıklar 2071.9 kg/m<sup>3</sup>–2173.7 kg/m<sup>3</sup>; 90 °C’de kür edilen örneklerde ise 2053.9 kg/m<sup>3</sup>–2156.1 kg/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik göstermiştir.

Numunelerde hem 60 °C hem de 90 °C’de kür süreleri artıkça görünür yoğunluk değerlerinin arttığı gözlenmiştir. 5 saat kür edilen UK ikameli geopolimer betonlarda UK ikamesinin artması ile birlikte görünür yoğunlukların arttığı da tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 60 ve 90 °C’de kür edilen numunelerin görünür yoğunlukları sırasıyla; 2253.7–2385.7 kg/m<sup>3</sup> ve 2280.4–2402.1 kg/m<sup>3</sup> arasında değişkenlik göstermiştir.

60 °C ve 90 °C’de kür edilen geopolimer betonlarda, kür süresi artıkça ultra ses geçiş hızları azalmıştır. Bununla birlikte, geopolimer betonların hazırlanmasında kullanılan UK ikame oranı artışıyla örneklerde ultrases geçiş hızının arttığı ve düşük sıcaklıklarda kür edilen örneklerde daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edildiği gözlenmiştir. Geopolimer betonların ultrases hızı değerleri 1.8 Km/sn–3.3 Km/sn arasında değişmiştir.

60 °C’de 5 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları 13.6 MPa–24.7 MPa; 24 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları ise 15.4 MPa–30.1 MPa arasındadır. Bu sıcaklıkta kür edilen örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı 24 saat kür edilen % 40 UK ikameli örneklerde elde edilmiştir.

90 °C’de 5 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları 8.3 MPa–22.9 MPa; 24 saat kür edilen örneklerin basınç dayanımları ise 16.7 MPa–31.4 MPa arasındadır. Bu

sıcaklıkta kür edilen örnekler içerisinde en yüksek basınç dayanımı yine 24 saat kür edilen % 40 UK ikameli örneklerde elde edilmiştir.

Geopolimer betonların SEM görüntüleri incelendiğinde iç yapıların birbirine benzer olduğu ve SEM – EDX analizlerine göre ise 60 ve 90 °C’de kür edilen örneklerin bünyesinde; silis, magnezyum, alüminyum, sodyum, kalsiyum, demir ve oksijen minerallerinin varlığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, hem 60 °C hemde 90 °C’de kür edilen örneklerde, 24 saatlik kür işlemi uygulanan örneklerin basınç dayanımlarının daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. 24 saatlik kür işlemi uygulanan örnekler incelendiğinde ise UK ilave oranının artması ile birlikte örneklerin basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte geopolimer betonlara uygulanan kür sıcaklığının örnek basınç dayanımları üzerinde önemli etkisi olmadığı görülmüştür. 60 °C’lik kür işlemlerinde % 40 UK ilaveli B5-24 örneklerinde 30.1 MPa, 90 °C’lik kür işlemlerinde ise yine % 40 UK ilaveli A5-24 geopolimer betonlarında 31.4 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Bu veriler ışığında, çalışmada üretilen geopolimer betonların uygulanabilir olduğu, bununla birlikte durabilite özelliklerinin ayrıca araştırılması gerektiği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, Y. (2008). Uçucu Küllerin Beton Kilitli Parke Taşı Üretiminde Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arıöz, Ö.(2009). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. 107M344 No'lu Tübitak Projesi, İnş. Müh. A.B.D., Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Aruntaş, H.Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri. Gazi Üniversitesi, *Müh. Mim. Fak. Der.*, **21**:193-203.
- ASTM C 618, (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash Elevated Temperature Curing. *Cement and Concrete Research*, **35**:1224–32.
- Batis, G., Pantazopoulou, P. Tsivilis, S. and Badogiannis, E. (2005). The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, **27-1**:125-130.
- Binici, H., Temiz, H., Aksoğan, O. and Ulusoy, A. (2009). The Engineering Properties of Fired Brick Incorporating Textile Waste Ash and Basaltic Pumice. *Journal of The Faculty of Engineering And Architecture of Gazi University*, **24**: 485-498.
- Brew, D.R.M. and Mackenzie, K.J.D. (2007). Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate. *J.Mater Science*, Doi: 10.1007/s10853-006-0376-1.
- Brough, A.R. and Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars. Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, **32**: 865–79.
- Çelikten, S. (2014). Çelik Fiber İçeren Yüksek Dayanımlı Beton Özellikleri Üzerine Metakaolin ve Öğütülmüş Pomzanın Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivananon, V. (2007). Work ability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, **29**: 224–9.
- De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F., Da Silva, F.J., Pavao, B. and Veit, H.(2011). The effects of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, **33**: 653-660.
- Erdoğan, S.T. (2014). Jeopolimerler Çevre Dostumudur? *Çimento ve Beton Dünyası*, **107**: 50-55.
- Fernandez - Jimenez, A., Palomo, J. G. and Puertas, F., (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behavior. *Cement and Concrete Research*, **29**: 1313-1321.
- Fernandez - Jimenez, A. and Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, **82**: 2259–65.
- Fernandez - Jimenez, A. and Palomo, J. (2005).Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, **35**: 1984–92.
- Frias, M., Cabrera, J., (2000). Pore size distrubition and degree of hydration of Metakaolin – cement pastes. *Cement and Concrete Research*, **30**: 561-569
- Gönen, B.C. (2012). Hazır Beton Üretiminde Kaliteyi Etkileyen Parametrelerin Spss Yöntemiyle İncelenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Görhan, G. ve Kürklü, G. (2015). Farklı Sınıf Çimento Harcı Üretiminde Metakaolin Katkısı Kullanımının Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.7, No.3
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S. ve Demir, İ. (2008). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **5-2**: 33-42.

- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. ve Mordoğan, H. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, 2005.
- Hamalı, Y.(2007). Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V. (2005). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, **101-6**: 467-472.
- Hu, M., Zhu, X. and Long, F. (2009). Alkali-activated fly ash – based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cement and Concrete Composites*, **31-10**: 762–8.
- Keyte, L.M., Lukey, G.C. and van Deventer J.S.J. (2006). The Effect Of Coal Ash Composition On Properties Of Waste Based Geopolymers’ Advances in geopolymer science and technology Springer Science LLC.
- Komnitsas K., Zaharaki D. (2007). Geopolymerisation: a review and prospects for mineral industry. *Elsevier Science Direct Minerals Engineering*, **20**: 1261-1277.
- Lecomte, I., Henrist, H., Liegeois, M., Maseri, F., Rulmont, A. and Cloots, R. (2006). (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. *J Eur. Ceram. Soc.*, **26**: 3789–97.
- Li, Z., Ding, Z. and Zhang, Y. (2004). Development of Sustainable Cementitious Materials. International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 55-76.
- Lkhagva, T. (2006). Uçucu Küllerin Agregası Olarak Beton Üretiminde Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nebiogulları, M.A. (2010). Metakaolin, Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Katkısının Beton Hidratasyon Sıcaklığına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated fly ashes, a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, **29-8**: 1323-1329.

- Pera, J. (2001). Metakaolin and calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Science Ltd.
- Qian, X. and Li, Z (2001). The relation ships between stres and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, **31**: 1607–1611.
- Rangan B.V,Hardjito D.,Wallah S.E. and Sumajouw M.J. (2005). Studies on fly ash-based geopolymer concrete. Proceedings of world congress geopolymer, France.
- Rattanasak, U. and Chindapasirt, P.(2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, **22**: 1073-1078.
- Schmucker, M. and Mac Kenzie, KJD. (2004). Micro structure of sodium polysialate siloxo geopolymer. *Ceram. Int.*, **31**: 433–7.
- Shi, C., Fernandez – Jimenez, A. (2006). Stabilization / solidification of hazar dousand radio active wastes with alkali-activated cements. *Journal of Hazard ous Materials*, **137-3**: 1656-1663.
- Siddique, R. and Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. *Applied Clay Science*, **43**: 392-400.
- Silva, P.D. and Crentsil, K.S. (2008). Medium - term phase stability of Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O geopolymer systems. - In: *Cement and Concrete Research*, **38**: 870-876.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindapasirt, P.(2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, **90**: 2118-2124.
- Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, **17-8**: 1143-48
- Tevrizci, M. M. (2010). Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- TS EN 12390-3, (2010). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri, Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.

- TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bilesim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- TS EN 197-1, (2009). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 771-1, (2005). Kagir Birimler, Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar). TSE, Ankara.
- TS EN 772-4, (2000). Kagir Birimler, deney metotları – Bölüm 4: Tabii taskâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütlelerinin tayini. TSE, Ankara.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.G.J. and Lorenzen, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: Part I. The theory and applications. *Minerals Engineering*, **10-7**: 659-669.
- Vu, D.D. (2002). Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete. Delft University Press, Netherlands.
- Xu, H. and Van Deventer, J.S.J. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, **59-3**: 247-66
- Xu, H. and Van Deventer, J.S.J. (2002). Geopolymerisation of Multiple Minerals. *Minerals Engineering*, **15-12**: 1131-39.
- Yardımcı, A. (2005). Santral çıkışı ile şantiye şartlarında C 20/25 ve C 25/30 hazır beton mukavemetinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 34-36.
- Yazıcı Ş., Anuk D. ve Arel H.Ş. (2010). Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, *S. Ü. Müh. Fak. Derg.*, **25-2**: 13-24.
- Yazıcı, H.(2004). Termik Santral Atığı Yapay Alçı – Uçucu Kül – Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Zeybek, O. (2009). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Zhang, J., Provis, J.L., Feng D., and van Deventer, J.S.J (2008). Geopolymers for immobilization of Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup>. *Journal of Hazardous Materials*, **157** (2-3): 587-598.

### **İnternet Kaynakları**

1-<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2013-cemen.pdf>,  
01.05.2016

2-[http://assets.panda.org/downloads/cement\\_blueprint\\_climate\\_fullenglrep\\_lr.pdf](http://assets.panda.org/downloads/cement_blueprint_climate_fullenglrep_lr.pdf),  
05.05.2016

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

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

5- [www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org), 21.05.2016

6-[http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi\\_malzemesi/beton/3.HTM](http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/beton/3.HTM),  
21.05.2016

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet GÜMÜŞ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar, 25.03.1987  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 538 384 65 20, ahm\_gum@hotmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Milli Piyango Anadolu Lisesi, (2002-2005)  
Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, (2006-2010)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2014-2016)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Limak İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş., (2010-2011)  
Atakey Patates Gıda San. Ve Tic.A.Ş., (2013-2013)  
A.K.Ü. Yapı İşleri ve Teknik Daire Bşk.lığı, (2013-Devam ediyor)