

**T.C.**  
**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE UÇUCU KÜL KATKILI**  
**GEOPOLİMER BETONLARIN %5 SÜLFÜRİK ASİT ETKİSİNDE**  
**MEKANİK DAVRANIŞI**

**MELİS BİLENLER ALTUNDAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN**  
**DR.ÖĞR. ÜYESİ ANIL NIŞ**

**İSTANBUL, 2019**

..... tarafından hazırlanan “.....  
.....” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri  
tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi  
..... Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak  
kabul edilmiştir.

**Danışman:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

.....

**Başkan :** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

.....

**Üye :** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: ...../...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Mustafa BAYRAM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Melis BİLENLER ALTUNDAL

...../...../2019

# YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE UÇUCU KÜL KATKILI GEOPOLİMER BETONLARIN %5 SÜLFÜRİK ASİT ETKİSİNDE MEKANİK DAVRANIŞI

(Yüksek Lisans Tezi)

Melis BİLENLER ALTUNDAL

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2019

## ÖZET

Durabilite dayanımla beraber betonda aranan en önemli özelliktir. Betonun durabilitesini artırmak için çimentonun belirli bir kısmı yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanılmaktadır. Bu tip betonlarda kullanılan bağlayıcının büyük bir bölümü Portland çimentosundan oluşmaktadır. Portland çimentosunun üretimi sırasında büyük miktarda CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleştiğinden ve ayrıca enerji maliyeti çok yüksek olduğundan betonda çimentosuz bir bağlayıcının kullanımı önem arz etmektedir. Son zamanlarda ortaya çıkan Geopolimer beton, çimentonun çevre ve enerji problemlerini büyük oranda ortadan kaldırmaktadır. Bu çalışma kapsamında gelecekte kullanılmasının yaygınlaşacağı düşünülen farklı Geopolimer betonların %5 sülfürik asit ortamındaki performansları değerlendirilmiştir. %100 uçucu küllü, %100 yüksek fırın cürufu, ve %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu olacak şekilde 3 farklı tip Geopolimer beton üretilmiştir. Geopolimer betonların üretiminde alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit bileşimi kullanılmıştır. Geopolimer betonların kimyasal durabilitesini karşılaştırmak amacıyla Portland çimentosundan oluşan beton da üretilmiştir. Üretilen betonların sülfürik asit ortamında dayanımı görsel denetim, ağırlık değişimi ve basınç dayanımı değişimi ile incelenmiştir. Sonuçlara göre uçucu küllü Geopolimer betonlar ısı kütüne ihtiyaç duyarken, cürufu Geopolimer betonlar ısı kütü olmadan da kullanılabilir. %50 uçucu kül ve %50 cüruf içeren betonlar %5 sülfürik asit etkisine karşı en iyi performansı gösterirken en kötü performansı ise uçucu küllü Geopolimer betonu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler : Sülfürik Asit Ortamı, Geopolimer, Uçucu Kül, Cüruf  
Sayfa Adedi : 58  
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

MECHANICAL BEHAVIOR OF FLY ASH AND SLAG BASED GEOPOLYMER  
CONCRETES UNDER 5% SULFURIC ACID ATTACK

(M.Sc. Thesis)

Melis BİLENLER ALTUNDAL

ISTANBUL GELISIM UNIVERITY

INSTITUTE OF SCIENCE

APRIL 2019

ABSTRACT

Durability is the one of the most important property of the concrete in addition to strength. The cementitious materials like fly ash and ground granulated furnace slag have already been used as a partial replacement of cement in order to enhance the durability of concrete. However, most of the binder materials in these concretes are composed of cement. Due to high energy prices and the CO<sub>2</sub> release as a result of the cement production process, cementless concrete becomes important in terms of both environment and economy. Recently, a cementless concrete named Geopolymer concrete can solve the energy and environment problems of the ordinary concrete. In the scope of the study, the chemical performances of different geopolymer concretes, which will be considered to be used in the future under %5 sulfuric acid attack were evaluated. Three types of geopolymer concretes, including 100 % fly ash, 50% fly ash and 50% slag and 100% slag. As a alkali activator, a combination of sodium silicate and sodium hydroxide were utilized in the production of the geopolymer concretes. For the comparison purposes, an ordinary concrete was also produced. The chemical performances of the concretes were evaluated by means of visual inspection, weight change, and compressive strength. The results showed that the fly ash based GPC specimens required heat-curing while heat curing is not required for slag based GPC specimens. The best chemical performance was obtained on 50% slag and 50% fly ash based GPC specimens, whereas the poorest performance was obtained on fly ash based GPC specimens.

Key Words : Sulfuric Acid Environment, Geopolymer, Fly ash, Slag  
Page Number : 58  
Supervisor : Asst.Prof.Dr. Anıl NİŞ

## TEŐEKKÖR

Bu tez alıŐması boyunca, bana desteklerini esirgemeyen Bakırköy Belediyesi'nden iŐ arkadaşlarıma, her daim yanımda olduğunu bildiğim ailem ve eŐime, çalıŐmam da titizlikle yanımda olan danışman hocam Anıl Niş'e sonsuz teŐekkőrlerimi sunarım. Tez çalıŐmasında kullandığım malzemelerin temini konusunda AKÇANSA firmasına ve Arda İnaŐat Harita Sanayi ve Ticaret Limited Őirketine teŐekkőr ederim. Deneylerimde bana yardımcı olan Gőkhan Altundal, Gőzde Tura, Yılmaz Kalay, Hőseyin KőekdalĐı ve Osman Seçil arkadaşlarıma ayrıca teŐekkőrlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ .....	5
2.1. Yüksek Fırın Cürufu .....	5
2.1.1. Betonda cüruf kullanımı .....	6
2.2. Uçucu Kül .....	7
2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı .....	7
2.3. Alkali Aktivatörler .....	8
2.4. Geopolimer Betonun Kimyasal Etkileri .....	10
2.4.1. Asit etkisi .....	10
2.5. Geopolimer Özellikleri .....	12
2.6. Betonun Dayanıklılığı ile İlgili Bazı Konular .....	13
2.6.1. Büzülme .....	13
2.6.2. Alkali - Agrega reaksiyonu .....	14
2.6.3. Isı dayanıklılığı .....	14
2.6.4. Islanma ve kuruma döngüsü .....	14
2.7. Geopolimer Betonun Dayanımını Etkileyen Faktörler .....	15
2.7.1. SiO <sub>2</sub> / Na <sub>2</sub> O oranı .....	15
2.7.2. Geopolimer betonda su miktarı .....	15
2.7.3. Sıcaklık ve kür süresi .....	16
2.7.4. Sodyum silikat-sodyum hidroksit sıvı oranı .....	16
2.7.5. Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltilisinin konsantrasyonu .....	16
3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	18
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri .....	18
3.1.1. Yüksek fırın cürufu .....	18
3.1.2. Normal portland çimentosu .....	19
3.1.3. Uçucu kül .....	20
3.1.4. Agregalar .....	21
3.1.5. Alkali aktivatörler .....	21
3.1.6. Kimyasal katkı .....	22
3.2. Deneysel Çalışma .....	23
3.2.1 Kalıplar .....	23
3.2.2. Alkali aktivatörlerin hazırlanması .....	24
3.2.3. Karışım hazırlanması .....	25
3.2.4. Geopolimer beton yapılışı ve dökümü .....	27
3.2.5. Kütleme .....	29
3.2.6. Sülfürik asit çözeltilisinin hazırlanması .....	31
3.2.7. Ağırlık değişimi .....	31

3.2.8 Basınç dayanımı testi .....	34
3.2.9 Yarma testi .....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	37
4.1. Görsel Denetim .....	37
4.2. Ağırlık Değişimi .....	39
4.3 Geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık testi .....	42
4.3.1. Basınç dayanımı .....	42
4.3.2. Yarma testi .....	47
5. SONUÇLAR .....	49
KAYNAKLAR .....	52
ÖZGEÇMİŞ .....	58





**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1 Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	18
Çizelge 3.2 Normal portland çimentosunun mekanik özellikleri .....	19
Çizelge 3.3 Normal portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....	19
Çizelge 3.4 Uçucu külün kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri .....	20
Çizelge 3.5 Agregaların fiziksel ve mekaniksel özellikleri .....	21
Çizelge 3.6 Sodyum silikatın kimyasal bileşimi ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	22
Çizelge 3.7 Kimyasal katkının özellikleri.....	22
Çizelge 3.8 Geopolimer beton hazırlama süreci .....	25
Çizelge 3.9 Geopolimer (yüksek fırın cürufu) karışım hesapları .....	25
Çizelge 3.10 Geopolimer (uçucu kül) karışım hesapları .....	25
Çizelge 3.11 Geopolimer (uçucu kül ve cüruf) karışım hesapları .....	26
Çizelge 3.12 Çimentolu beton(OPC) karışım hesapları.....	26

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Puzolanik malzemelerin yapısı [21] .....	6
Şekil 2.2 Uçucu kül alkali aktivasyonunun şekli [35] .....	9
Şekil 3.1 Deneyde kullanılan yüksek fırın cürufu .....	18
Şekil 3.2 Deneyde kullanılan agregalar (a) kaba agrega (b) ince agrega.....	21
Şekil 3.3 Deneyde kullanılan kimyasal katkı.....	22
Şekil 3.4 Kalıp çeşitleri; deneyde kullanılan küp ve silindir kalıplar .....	23
Şekil 3.5 Alkali çözelti hazırlanması .....	24
Şekil 3.6 Beton numunelerin döküm aşaması.....	29
Şekil 3.7 Normal portland çimentolu beton numunelerin kürlenmesi.....	30
Şekil 3.8 Geopolimer beton numunelerin 70°C fırında kürlenmesi .....	30
Şekil 3.9 %5 Sülfürik asit çözeltisinde bekletilen numuneler .....	31
Şekil 3. 10 Elde edilen numunelerin normal ortam ve asidik ortamda bekletilip kütle değişimi .....	34
Şekil 3. 11 Basınç dayanım test örneği.....	35
Şekil 3. 12 Silindir numunelerde yarma testi.....	36
Şekil 4.1 %5 Sülfürik asite maruz kalan numunelerin yüzeysel değişiminin görsel incelenmesi .....	39
Şekil 4. 2 Numunelerin hava ve sülfürik asit ortamında ağırlık değişimi .....	41
Şekil 4. 3 Farklı ortamlardaki numunelerin basınç dayanımı .....	47
Şekil 4. 4 Numunelerin sülfürik asit etkisinde yarma dayanımı değişimi .....	48

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
°C	Santigrad
<b>mPa</b>	Megapaskal
<b>mm</b>	Milimetre
<b>gr</b>	Gram
<b>µm</b>	Mikrometre
<b>NaOH</b>	Sodyum Hidroksit
<b>KOH</b>	Potasyum Hidroksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	Sodyum Silikat
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>CaO</b>	Kalsiyum oksit(Sönmemiş Kireç)
<b>SO<sub>3</sub></b>	Kükürt trioksit
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Potasyumoksit
<b>Cl</b>	Klor
<b>S</b>	Kükürt
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Titanyumdioksit
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Manganik oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum Dioksit
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Sodyum Oksit
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum Oksit
<b>MgO</b>	Magnezyum Oksit
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Demir (II) Oksit
<b>Ca</b>	Kalsiyum
<b>Si</b>	Silisyum
<b>O</b>	Oksijen
<b>Si-Al</b>	Silisyum-Alüminyum
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Kalsiyum Hidroksit
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	gram/santimetreküp

<b>kg/m<sup>3</sup></b>	kilogram/metreküp
<b>kg</b>	kilogram

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
--------------------	--------------------

<b>A</b>	Asidik Ortam
<b>C</b>	%100 Cürüflu Beton
<b>C+UK</b>	%50 Cürüflu ve %50 Uçucu Küllü Beton
<b>N</b>	Normal Ortam
<b>OPC</b>	Normal Portland Çimento
<b>UK</b>	%100 Uçucu Küllü Beton

## 1. GİRİŞ

Beton; kum, çakıl (veya kırma taş, hafif agrega v.b.), çimento ve suyun karıştırılmasından elde edilen yapının ana malzemesidir. Genellikle, Normal Portland Çimentosu (OPC) dünya da bağlayıcı olarak kullanılmaktadır ve yaklaşık olarak 2013 yılında 4 milyar ton çimento üretilmiştir [1]. Çimentonun yıllık üretim miktarının önümüzdeki 10 yıl içerisinde %25 oranında artması öngörülmektedir. Aynı zamanda agrega rezervi çimento üretiminin ana malzemelerinden biri olduğu için 25 ile 50 yıl sonra ciddi bir rezerv sıkıntısıyla karşılaşabilir. Günümüzde küresel ısınma önemli bir konu ve dünya çapında salgılanan CO<sub>2</sub>'nin %7'sinin çimento üretiminden sorumludur [2]. Serbest bırakılan CO<sub>2</sub> miktarı artan nüfusla artmıştır. 1 ton çimento üretiminden yaklaşık olarak 820 kg CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır [3]. Çimento, alüminyum ve çelik gibi diğer malzemelere kıyasla çok daha fazla enerji gerektirir [4].

Bu serbest bırakılan CO<sub>2</sub> çevre, çimento üreticileri ve insanlar için sorundur. Bu çevresel konuda OPC yerine yeni inşaat malzemelerinin kullanılmasına ihtiyaç vardır. Betonun mekanik performansını ve durabilitesini artırmak için çalışmalar yeni malzemeler üzerine yoğunlaştı[5]. Araştırmacılar tarafından, geopolimerler veya alkali aktif olarak adlandırılan çimentoya alternatif yeni bir bağlayıcı malzeme türü üzerinde çalışmalara başlandı. Geopolimerler, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin v.b. gibi farklı alüminosilikat malzemelerin alkali aktivasyonundan sentezlenen polimerik bağlanma materyallerinden biridir. Geopolimer beton, mekanik özellikler, yangın performansı ve asit direnci açısından OPC betona göre daha üstündür [4],[6].

OPC üretimi sırasında, atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı, geopolimer beton üretilmesinden yaklaşık % 80 daha fazladır ve bu da geopolimer betonu çevre dostu bir yapı malzemesi haline getirmektedir[7].

Geopolimer beton bağlayıcı olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkalileri gibi endüstriyel ürün kullanmaktadır (Pillow, 1989; Glory, 1989). Ayrıca, geopolimer beton üretiminde en çok kullanılan malzeme uçucu kül ve yüksek fırın cürufudur. Alışılmış

Portland çimentosunun yerini alan yüksek fırın cürufu ise betonun fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimini ve mukavemetini arttırmak için kullanılmıştır[8].

Geopolimerler, çeşitli sodyum silikat çözeltilerinin alkali aktivasyonunda veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi endüstriyel üründen sodyum-silikat polimerinin ürünleridir[9]. Geopolimer ve doğal zeolitik materyaller benzer kimyasal bileşime sahiptir, ancak geopolimerlerin mikro yapısı amorfudur. Kaynak materyaller ve alkali aktivatörler, kimyasal mikro yapıya dayanan geopolimerizasyonun nihai ürünlerini etkiler [10]. Polimerizasyon işlemi çoğunlukla sıcaklıkla hızlandırılır. Uçucu kül geopolimerin erken dönemlerde dayanım kazanımı, sıcaklık ile sertleşen numunelere kıyasla ortam sıcaklığında daha düşüktür [11].

Yapı malzemelerinde aranan özellikler iyi mukavemet ve dayanıklılıktır. Portland çimentosu, iyi bir dayanıma sahip olmasına rağmen, şu ana kadar yapılan çalışmalarda, asit veya sülfat saldırısı gibi yüksek sıcaklık ve şiddetli çevresel koşullara karşı zayıf performans sergilediğini göstermektedir. Geopolimer betonun kimyasal dayanıklılık çalışmaları konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Davidovits ve diğerleri kimyasal saldırılara karşı kilo kayıplarını incelediler ve %78 ve %95 kilo kaybı gösterdiğini, geopolimer örneklerinde ise 28 gün süreyle sülfürik asit ve hidroklorik aside maruz kaldığında sırasıyla %6 ve %7 kilo kaybı olduğunu gösterdi [12].

Bakharev, 5 ay boyunca %5 asit çözeltisine maruz kalan uçucu kül geopolimer betonun performansını araştırdı ve Geopolimer beton numunelerinin Portland çimentosuyla karşılaştırdığında Geopolimer betonların daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir [13]. Wallah ve Rangan geopolimer beton örneklerinin aynı zamanda Portland çimentosuyla üretilen beton numunelerden daha yüksek dayanıma sahip olduğunu belirtmiştir [14].

Portland çimentosunun çevresel ve sürdürülebilirlik sorunları nedeniyle Geopolimer betonun ilerleyen günlerde daha fazla kullanılacağı açıktır. Çimento üretiminin bir sonucu olarak, havaya yaklaşık %8 oranında karbondioksit salınmaktadır. Roy ve Idorn'un yaptığı çalışmaya göre, yüksek fırın cürufu gibi diğer bağlayıcılarla üretilen betonlar, sera gazı emisyonlarını yaklaşık %80 oranında azaltmaktadır [15]. Ayrıca, Duxcon ve diğerleri [16] bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılmasının, çimento üretiminin neden olduğu sera gazı emisyonunu %80 ile %90 oranında düşürdüğünü belirtmiştir. Bu nedenle, bilim adamları,

iyi bir asit direnci, yüksek termal kararlılık, düşük CO<sub>2</sub> emisyonu ve iyi mekanik özellikler gibi avantajları nedeniyle Geopolimer beton kullanmayı gerekli bulmuşlardır. Bu bölüm, Geopolimer terminolojisinin ve kimyasının bir özetini sunmaktadır. Geopolimer teknolojisinin ek incelemesi başka çalışmalarda da mevcuttur [17].

### Araştırmanın Önemi

Beton üretiminde Portland Çimentosu (OPC) yerine çevre dostu Geopolimer betonun geçmesi düşünülmektedir. Geopolimer betonun önemli çevresel üstünlüğünden dolayı Portland çimentosundan daha fazla kullanılacağı düşünülmektedir. Yapılan çalışmamızda Portland çimentosu yerine kullanılacak farklı Geopolimer betonların %5 sülfürik asit çözeltisinin saldırılarındaki performansının incelenmesi ve bu betonların aynı kimyasal etki altındaki Portland çimentosu ile üretilen numunelerle karşılaştırılarak Geopolimer betonların kimyasal durabilite performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır.

### Tezin Ana hattı

Bölüm 1 Özet: Tezin özeti ve amaçları anlatıldı.

Bölüm 2 Literatür Taraması ve Geçmiş: Geopolimer betonun literatür taraması ve uçucu kül ve cüruf bazlı Geopolimer betonun bağlayıcı olarak etkisi ve Geopolimer betonların kimyasal saldırılara karşı dayanıklılığı hakkındaki çalışmalara yer verilmiştir.

Bölüm 3 Deneysel Çalışma: Malzemeler, karışımlar, döküm, kür metodu ve test yöntemleri anlatılmıştır.

Bölüm 4 Test Sonuçları ve Tartışmalar: Gösterme, değerlendirme ve test sonuçlarının tartışması sunulmuştur.

Bölüm 5 Sonuçlar: Tezin sonuçları verilmiştir.

### Puzolanik Malzemeler

Puzolan, ortam sıcaklığında kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girdikten sonra çimentolu özelliklere sahip bileşikler oluşturabilen silisli bir alüminik malzemedir [18]. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu en yaygın kullanılan puzolanik malzemelerdir. Çimentonun puzolanik malzemeler ile değiştirilmesi betonun erken yaş mukavemetini azaltabilir. Fakat ileriki yaşlarda betonun performansını iyileştirdiği bilinmektedir.

### Geopolimer Beton

1970'lerin sonunda Geopolimer tanıtıldı ve Fransız bilim adamı Joseph Davidovits tarafından keşfedildi. 1980'ler ve 1990'lar boyunca yapısal olmayan alanlar için Geopolimer kullanımı arttı. Geopolimer, amorf bir mikro yapıya sahip ve alkali bir ortamda üretilen iki alüminosilikat polimer ile üretilmiştir. Geopolimer betonun özellikleri iki ile üç boyutlu Si-O-Al'in yapısıdır.



## 2. GEOPOLİMER BETONUN BİLEŞENLERİ

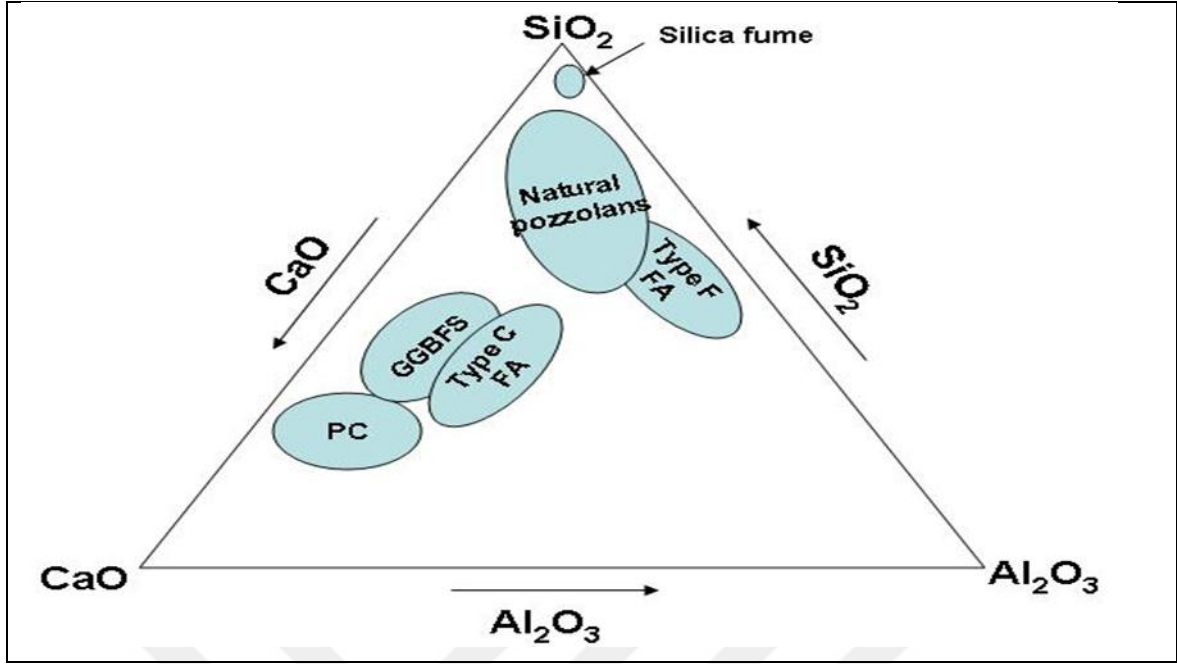
### 2.1. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir metal ergitme işleminden üretilen bir malzemedir. Genellikle silika ve metal oksitlerin bir karışımını içerir. Yüksek fırın cürufu, sıvı metali en aza indirmeye ve eritme ile sıcaklık kontrolüne yardımcı olmak gibi birçok amaç için kullanılabilir [19]. Beton ve çimento imalatında da kullanılmaktadır.

Normal Portland Çimento'nun cürufu ile yer değiştirilmesi, taze betonun daha iyi işlenebilirliği ve yaşam döngüsü maliyetlerini azaltma gibi çeşitli faydalar sağlar [19]. Normal Portland çimentosu yerine cürufun kullanılmasının diğer avantajları, kimyasal etkilere karşı daha iyi performans gösterir ve daha iyi bir basınç dayanımına sahiptir [19].

Küçük parçacıklar, alkali aktive sistemlerdeki cüruf ve çimento karışımında hakimdir. 20  $\mu\text{m}$  'den büyük parçacıklar genellikle yavaşça hidrasyona uğrarken, 2  $\mu\text{m}$ 'den küçük parçacıklar 24 saat boyunca tamamen hidrasyona uğrar. Sonuç olarak, cüruf malzemesi ile üretilen Geopolimer betonda, bağların mukavemetini kontrol etmek için partikül büyüklüğünün doğru kontrolü sağlanmalıdır [20].

Temel olarak "cüruf" olarak adlandırılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, bir endüstriyel malzemedir ve sıvının su ile soğutulmasıyla üretilir. Yüksek fırın cürufunun içeriği, bir yüksek fırın içindeki demir malzemeleriyle aynı zamanda erimiş bir durumda geliştirilmiş kalsiyum ve farklı fazlardaki silikatlar ve alüminosilikatlarıdır.



Şekil 2.1 Pozzolanik malzemelerin yapısı [21]

Yüksek fırın cürufunun bileşiminde % 8-24  $Al_2O_3$ , % 28-38  $SiO_2$ , % 30-50  $CaO$  ve % 1-18  $MgO$  vardır. Cürufta  $CaO$  miktarının yüksek olması genellikle betonun basınç dayanımında bir iyileşmeye yol açar. Kimyasal karışımlar, belirli bir yüksek fırın cürufunu uçucu kül ile karşılaştırıldığında orta derecede sürekli kalır. Şekil 2.1, pozzolanik malzemelerin karışımlarını göstermektedir. Ayrıca, yüksek fırın cürufu ile beton kullanmak daha düşük hidrasyon ısısı gibi avantajlara sahiptir.

### 2.1.1. Betonda cüruf kullanımı

Ortam sıcaklıklarında çimento yerine betonda yüksek fırın cürufu kullanılması, Portland çimentosu ile hazırlanan betona kıyasla daha düşük bir oranda mukavemet artırımlarına yol açar [22,23]. Basınç dayanımındaki azalma miktarı, kullanılan cürufun aktivitesine bağlıdır [24,25]. Portland çimentosu ve su karışımı sırasında, hidrasyon adı verilen kimyasal bir reaksiyon başlatılır ve kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) oluşumu başlar. Kalsiyum-silikat-hidrat(CSH), Portland çimentosunda basınç dayanımını artırır. Öte yandan kalsiyum hidroksit (CH), hidrasyon işleminin sonucunda oluşan bir materyaldir ve mukavemette önemli bir etkiye sahip değildir. Cürufta silikatlar, ilave C-S-H oluşturmak için CH ile birleşir. Bu da % 100 Portland çimentosu ile üretilen betonlarla ile

kıyaslandığında, nihai mukavemeti arttırabilecek daha sert bir bağlayıcı ve yoğunluğa yol açabilir.

Cürufun tanımının metalurjik sanayi yan ürünleri olduğu ve kalsiyum, magnezyum alüminosilikat camı içerdiği bilinmektedir. Yüksek fırın cürufu en çok demir ve çelik endüstrisinde üretilir.

## **2.2. Uçucu Kül**

Uçucu kül, kömürün yanması sonucu ortaya çıkan bir geopolimer malzemesidir. Termik santrallerde kullanılan taş kömürün yaklaşık olarak %10 ile %15'i, linyit kömürün ise %20 ile %50'si kül olarak çıkmaktadır. Bu külün %75 ile %85'i baca gazları ile kazandan çıkar ve bunlar uçucu kül olarak adlandırılır. Baca gazlarında uçucu küllerin tutulması amacıyla genel olarak yüksek verimli elektrofiltreler kullanılmaktadır [25].

Uçucu kül, yanan kömürün cinsine, katkı maddesi içeriğine ve yanma şekline göre fiziksel, kimyasal, minerolojik ve puzolanik özelliklerinde değişiklik gösterebilir. Uçucu kül, yanan kömüre ve yanış şekline göre grinin tonlarını almaktadır. İyi yanan bir kömürden elde edilecek olan uçucu kül daha açık gri tonunu alır ve yanmanın tamamlanmadığı yerlerde uçucu kül siyah rengi alır. Külün boyutlarının da bacadan kaçan kısım azaldıkça ve kömürün öğütölme derecesi arttıkça, azaldığı gözlemlenmiştir. Uçucu külleri kimyasal olarak değerlendirildiğinde;  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{MgO}$ 'in yer aldığı bileşiklerden oluştuğu görülmektedir. Külün içerisindeki karbon oranı, kömürün özelliğine ve yanma şekline göre farklılık göstermektedir. Kullanılan kömürün özelliğine göre  $\text{CaO}$  farklı miktarlarda bulunabilmektedir. Uçucu küllerin bağlayıcı olarak kullanılmasının ekonomik olmasının yanı sıra çevre dostu olduğu içinde kullanımı önem arz etmektedir.

### **2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı**

Betonda uçucu kül kullanılması, diğer malzemeler kadar eskiye dayanmamaktadır. Gelişen teknoloji ile beraber enerji kullanımı giderek artmaktadır ve enerjinin temin edilmesi de gün geçtikçe daha pahalı hale gelmektedir. Bu nedenle endüstriyel atıklardan birisi olan uçucu kül kullanımı her geçen gün artmaktadır. Atık malzeme olarak bilinen uçucu kül, betonun

maliyetini düşürmektedir ve bununla birlikte taze ve sertleşmiş betonun bir çok özelliklerini iyileştirmektedir. Uçucu küller yapısal olarak küresel oldukları için ve suya fazla ihtiyaç duymadığı için, düşük su miktarı ile istenilen işlenebilirliği sağlanabilmektedir.

Yüksek alkali konsantrasyon ve geopolimer bağlayıcıda Ca varlığı, hem kimyasal saldırıya karşı yüksek direnç hem de alkali bağlayıcıların yüksek mukavemetli gelişimine katkıda bulunmuştur [26,27]. Düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren geopolimer betonun yüksek dayanıklılık direnci nedeniyle OPC betona alternatif olabilir. Araştırmacılar, kütleme sıcaklıklarının 45 °C ile 80 °C arasında değişiminin, uçucu küllü geopolimer örneklerin, molar konsantrasyonun, karışım oranlarına odaklandı [28] .

Uçucu küllü geopolimer numunelerin ısıl kütleme nedeniyle yerinde dökülen beton uygulamalarında kullanımını sınırlamaktadır. Bu sınırlama, karışımda uygun miktarda nano-silikanın eklenmesiyle giderilebilir [29]. Nano silika ile geopolimer örnekleri, Si ve Si-Al fazlarının çözünme derecesini artırır ve bu fazlar polimerizasyon sürecini kuvvetle artırır [30]. Uçucu küllü geopolimer betonun, belirli bir doza kadar nano silikanın eklenmesi ile mekanik mukavemeti güçlenirken, diğer nano silika ilavesiyle azalmaya başlar [31].

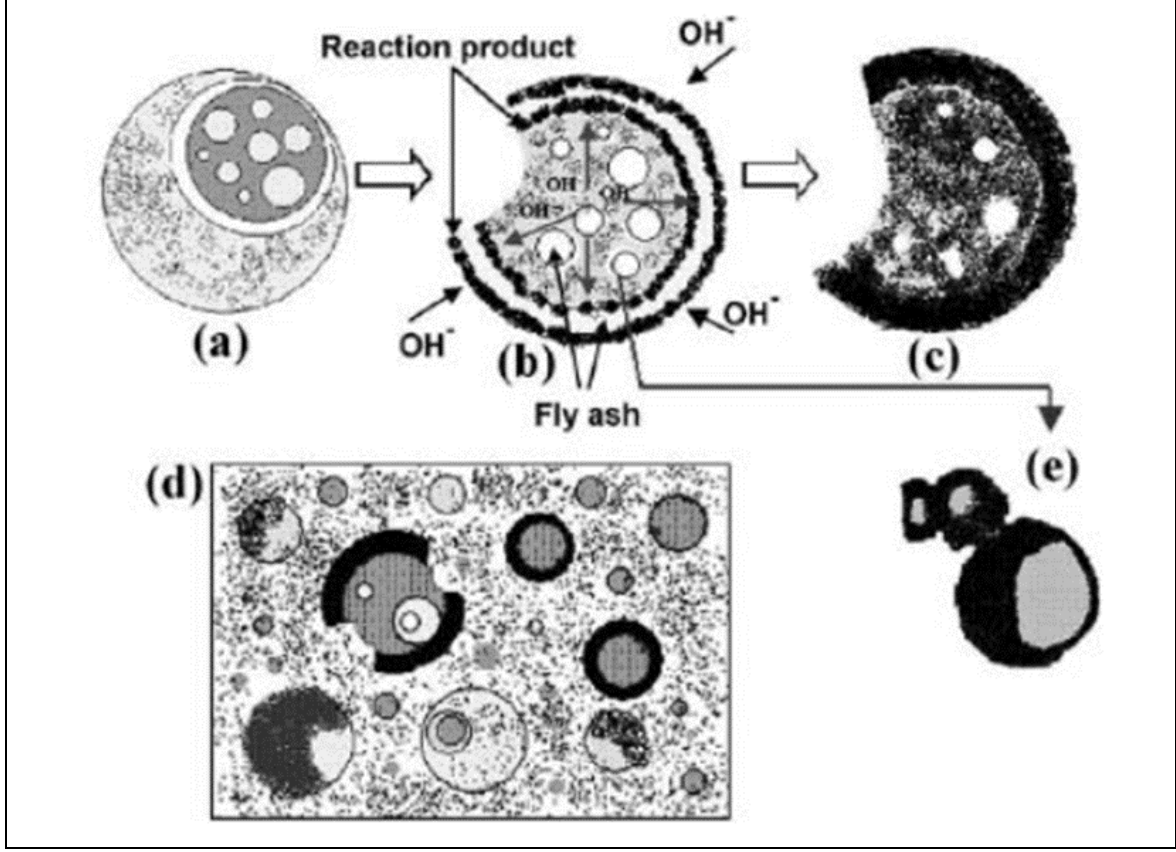
### **2.3. Alkali Aktivatörler**

Genel olarak, geopolimer beton üretimi için kullanılan alkali aktivatör, sodyum silikat ve sodyum hidroksit (NaOH) veya sodyum hidroksit içeren bir potasyum hidroksit (KOH) karışımıdır [1], [32] - [33].

Van Deventer ve Xu (2000) çalışmalarında alkali çözelti ile kaynak materyal arasındaki etkileşimin NaOH sıvısı eklenerek iyileştirildiğini açıklamıştır [33].

Palomo ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada uçucu külün aktive edilmesinde kullanılan alkali aktivatörün reaksiyon gelişimini önemli ölçüde etkilediğini belirtti. Üstelik, alkali aktivatör çözeltisinin sadece tek alkali kullanımına kıyasla silikat, potasyum veya sodyum silikat içerdiği zaman tepkimelerin zamanla arttığını belirtmişlerdir [34].

Uçucu külden elde edilebilen alüminyum ve silikanın parçalanma işlemi Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Uçucu kül alkali aktivasyonunun şekli [35]

Davidovits (1994) uçucu kül geopolimerde polimerizasyon işleminden, uçucu kül içindeki silika ve alümina iyonlarını çözmek için yüksek alkali çözeltiler gerektirdiğinden bahsetmiştir. Alkali sıvılar, geopolimer bağlayıcıların ana bileşenleridir. Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu prensibi ilk olarak 1940'larda Purdon'ın Kimya Endüstrisi Derneği (Belçika) dergisinde “Yüksek fırın cürufu üzerine alkalinin etkisi” konulu bir makale yayınladığında kullanılmıştır [36].

Son zamanlarda, geopolimer bağlayıcıların üretimi için alkali sıvılar kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sodyum hidroksit ile sodyum silikat çözeltisi, birçok araştırmacı tarafından kullanılan en popüler alkali aktivatördür. Aslında, Van Jaarsveld ile arkadaşları ve Silverstrim ile arkadaşları (1997), Sodyum hidroksit ve silikat birleştirdiklerinde jeopolitik uçucu küllü çimentoları geliştirdi [9].

## 2.4. Geopolimer Betonun Kimyasal Etkileri

OPC betonu üzerinde yapılan kimyasal dayanıklılık testleri ile beton malzemelerin sülfat atağına karşı karmaşık bir mekanizmaya sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bir başka sebep ise sülfatlı çözeltiler ile çimento hidratasyon ürünleri arasındaki reaksiyonlardır ve bu reaksiyonlar sonucu farklı şekillerde kendini açığı çıkarmaktadır. OPC betonu üzerine sülfat reaksiyonlarının testleri, CH, C – S – H ve birçok çimento macununun alüminat faktörlerini içeren reaksiyonları netleştirebilir [37], [38].

Sülfat atakları sonucu betonda çatlak ve genişlemenin doğrudan ya da dolaylı olarak ortaya çıktığı reaksiyonlar sonucu, alçıtaşı oluşumuna ek olarak betonun bozulmasının yanı sıra C-S-H'nin tahrip edilmesiyle de parçalanma ve numune yüzeylerinde yumuşatma meydana gelir. Sıcaklık ile sertleşen düşük kalsiyumlu uçucu kül geopolimer betonlar, sülfat atağına karşı güçlü bir direnç gösterir. Sodyum sülfata maruz kalan uçucu küllü beton örneklerinde bir yıla kadar yüzeyde bozulma veya çatlama belirtileri görülmemiştir. Ayrıca, basınç dayanımı değerleri ise neredeyse aynı kalmıştır. Bunun yanında, farklı zamanlarda sodyum sülfat çözeltisine maruz kalan geopolimer numunelerindeki uzunluğun değişmesi, ilk geopolimer betonundan % 0,01 oranında daha az etkili olmuştur [14]. Ayrıca, farklı sülfat çözeltilerinde, en iyi performans, sodyum hidroksit çözeltisi ile hazırlanan geopolimer malzemesinde gösterildi ve basınç dayanımının artan sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir. Numuneler sülfat çözeltileri içine daldırıldığında yaklaşık % 10 civarında dayanım kaybı meydana gelmiştir [39].

### 2.4.1. Asit etkisi

Geopolimer betonun Portland çimentolu betona karşı bir avantajı da kimyasal etkilere karşı daha üstün performans göstermesidir.

Glukhovsky tarafından alkali ile aktive olmuş cüruf harçlarının hidroklorik asite maruz bırakıldığı ve yapılan testler sonrası hidroklorik asit çözeltilerinden (pH = 3) çıktıktan sonra bile Geopolimer harçlarının gerilme mukavemetinin arttırdığı bildirilmiştir [40]. Alkali-aktif cüruf harçlarının altı ay boyunca % 5 asit çözeltisine maruz kalması, birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve betonların sitrik asit çözeltilerine maruz kalması durumunda

dayanımlarında bir miktar düşüş rapor edilmiştir. Nitrik ve hidroklorik asite maruz betonların değişiminin çok az olduğu, sülfürik asit kullanıldığında ise normal betonlarda oluşan dayanım kaybının çok fazla olduğu ve Geopolimer betonların daha az değişime uğradığı ve bu değişimin betonun dış yüzeylerinden de anlaşıldığı belirtilmiştir [41]. Davidovits ve arkadaşları % 5 hidroklorik ve sülfürik asit çözeltilerinde Portland çimentosuyla yapılan betonların ve Geopolimer betonların dört haftalık kimyasallara maruz bırakıldıktan sonra alkali ile aktive edilmiş Geopolimer betonların kimyasal tepkime nedeniyle ağırlıklarında % 6-7'lik kayıplar meydana geldiği, Portland çimentolu betonun ise ağırlık kayıplarının % 78-95 mertebelerinde olduğunu bildirmiştir [42].

Palomo ve arkadaşları tarafından metakaolin karışımları, sodyum hidroksitle aktive edilen geopolimer beton karışımların 90 gün boyunca deniz suyuna (pH = 7), sülfürik aside (pH = 3) ve sodyum sülfata (pH = 6) maruz bırakılmıştır. Kimyasal ortama maruz bırakılma süresince eğilme mukavemetinin 28. güne kadar bir miktar azalabileceği, 28-56. günler arasındaki maruz bırakma sürelerinde ise betonların eğilme dayanımlarında bir miktar yükselme olduğu ve daha fazla 56-90. günler arasındaki maruz kalma sonucunda Geopolimer betonunun eğilme dayanımının düştüğü belirtilmiştir [43]. Ayrıca değişik asitler altında betonda aynı eğilme davranışı elde edilmiştir. Araştırmacılara göre reaksiyona girmemiş olan sodyum parçacıkları, hidratasyon reaksiyonlarına katılmadığından betonda çözünebilir durumda kalmıştır. Bu yüzden bağlayıcının dayanımını daha az arttırmalar. Öte yandan yaklaşık 3 ay sonra, hidrate olmamış sodyum parçacıkları hidrate olarak reaksiyon sürecini devam ettirirler. Bu nedenle, basınç dayanımında artmalar meydana gelebilir. Stegmann ve Shi tarafından yapılan bir çalışmada [44], farklı betonların nitrik asit altında performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, betonların kimyasal etkiler altında performanslarının betondaki gözenekler ile alakalı olduğu ve asit saldırıları pH değeri düştükçe betona daha çok zarar verdiği belirtilmiştir.

Bakharev ve arkadaşları Portland çimentosuyla elde edilen betonu ve sodyum hidroksitle ile aktifleştirilmiş cürufli Geopolimer betonunun asetik asit saldırısına karşı direncini incelemiştir. Sonuçlara göre cüruf içeren Geopolimer betonda % 33 ağırlık kaybı gözlenirken, Portland çimentosuyla yapılan betonda ise % 47 ağırlık kaybı meydana gelmiştir [45]. Portland çimentosuyla yapılan betonlar yüksek CaO içerdiğinden dolayı daha fazla bozulma meydana geldiği belirtilmiştir ve daha az serbest kalsiyum içeren betonların, asit ortamında çok daha üstün bir performans gösterdiği özetlenmiştir.

Song ve ark. [46] alkali ile aktive edilmiş uçucu küllü betonları ve Portland çimentosuyla üretilen betonları 8 haftalık % 10 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakmışlardır. Sonuçlara göre, Portland çimentosu %35'lik ağırlık kaybı gösterirken, uçucu küllü Geopolimer betonda ise %3'lük bir ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

Çevik ve arkadaşları [47] yaptıkları bir çalışmada uçucu küllü Geopolimer betonun ve Portland Çimentosuyla üretilmiş betonun deniz suyu, magnezyum sülfat ve sülfürik asit solüsyonları altındaki davranışını incelemişler ve uçucu kül içeren Geopolimer betonların bütün kimyasal etkiler karşısında Portland çimentosuyla üretilen betonlardan daha üstün performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kimyasal solüsyonlardan en zararlısının sülfürik asit ortamı olduğunu belirtmişlerdir.

Kurtoğlu ve arkadaşları [48] yaptıkları bir çalışmada sülfürik asit etkisinde durabilitesi en yüksek betonların, uçucu küllü üretilen Geopolimer betonlar olduğunu belirtmişlerdir.

## 2.5. Geopolimer Özellikleri

Uzun süreli durabilite testlerine ek olarak Geopolimerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Davidovits vs. (1988) geopolimerlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde birçok test yapmış ve geopolimerlerin donma / çözülme döngülerine, korozyon ve sülfat atağına karşı, erken dayanım ve yüksek dayanıklılık gibi istisnai özelliklere sahip olabileceği kanaatine varmıştır [49]. İlk sertleşme süresi boyunca, Geopolimerlerin basınç mukavemeti 30 MPa'ya kadar ulaşabilir, bu da son mukavemetin yaklaşık % 75'ini oluşturur. Sonuç olarak, Normal Portland çimentosu ile üretilen beton harçlarına kıyasla, Geopolimer harçlar daha erken dayanım elde edebilirler. Palomo ve arkadaşlarına göre, kür sıcaklığındaki artış geopolimer bağlayıcılardaki reaksiyonu hızlandırır(1999). Daha yüksek sıcaklık Geopolimer betonlarda, daha yüksek dayanıma erken sürede ulaşmayı sağlar [43].

OPC ile geopolimer kıyaslandığında, geopolimer bağlayıcılarının sıcaklık direncinde üstün özellikleri vardır. (Davidovits 1988 ve 1994). 300 °C'ye kadar sıcaklık altında Portland çimentosu betonlarının basınç dayanımında önemli bozulmalar olurken, 600 °C'de



Geopolimer bağlayıcılarda önemli bir bozulma gözlenmemiştir. Ayrıca, Geopolimerlerin Portland çimentosuna göre daha düşük büzülme gösterebilirler [14].

Mekanik ve fiziksel özelliklerine ek olarak, geopolimer malzemeler asidik ortama karşı dayanıklılık gibi üstün kimyasal özellikler de ortaya çıkarmıştır [50]. Comrie ve diğerlerinin belirttiği gibi, kirecin Portland çimentosunun aksine yapıda önemli bir rol oynamamasının Geopolimerlerin şiddetli kimyasal saldırılara karşı dayanıklılığına sebep gösterilebilir [51].

Normal Portland Çimentosu betonunun bozulmasında, içeriğinde bulunan alkali-silika reaksiyonlarından veya alkali-karbonat reaksiyonundan dolayı da bozulma gerçekleşebilir. Bu reaksiyonların bir sonucu olarak betonda çatlaklar gözükülebilir. Çimentoda ve reaktifte alkali gibi yan etkenler, kimyasal sürecin oluşmasını engelleyebilir (Davidovits, (1994)).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların asite karşı direnci Portland çimentosundan daha fazladır. Portland çimentosu içerdiği yüksek kalsiyum nedeniyle asit tarafından daha çok bozulmaya yol açmaktadır[14]. Bakharev tarafından,% 5 oranında asetik ve sülfürik asit çözeltilerine maruz kalan betonlarda uçucu kül ve alkali aktivatörler kullanılarak geopolimer betonlarının durabilitesi araştırılmıştır. Sonuçta, OPC asitte Geopolimer betona kıyasla çözülmeye maruz kaldığı gösterilmiştir.

## **2.6. Betonun Dayanıklılığı ile İlgili Bazı Konular**

Bazı sanayi sularında ve sanayi ile ilişkisi olan atıklarda, ortaya çıkan baz ve asidik maddelerde, beton çok kötü etkilenmiştir. pH'ın 4'ten az olacağı yerlerde ve özellikle kimyasal saldırı altında, asit çözeltilisinin hızlı bir şekilde mekanik aşınmayı beraberinde getirdiği yerlerde betonlardaki bozulma çok daha hızlı olmaktadır.

### **2.6.1. Büzülme**

Büzülme, beton hacminde zamana bağlı azalma olarak tanımlanır ve büzülme dış faktörlerden etkilenmez. Plastik, kimyasal, termal ve kuruma büzülmesi olarak sınıflandırılır [52,53]. Wallah ve Rangan (2006), ısıyla sertleşen uçucu kül esaslı geopolimer betonun, yaklaşık 100 mikrostrain değerinde kuruma büzülmesi gösterdiğini bildirmiştir.

### 2.6.2. Alkali - Agrega reaksiyonu

Alkali-silika reaksiyonunun alkali bir çözelti ile çimentodaki alkali oksitler ve agrega içinde bulunan reaktif silika ile kimyasal bir süreci vardır. Alkali-silika reaksiyonunun artması, Portland çimentosu içerisindeki  $\text{Ca(OH)}_2$  nedeniyle gerçekleşir.  $\text{Ca(OH)}_2$ , nihayetinde sert bir kristalin yapıya dönüşen amorf, çimentolu kütlelerin bozulmasına ek olarak genişlemeye neden olabilen bir jel oluşturarak, uygun nemlilik nedenleriyle aktivatör alkali (NaOH, KOH) ile reaksiyona girebilir [54]. Normal Portland betonunda alkali-silis jeli şişmeye kolayca yardımcı olacağı için su-çimento oranı düşük olmalıdır. Uçucu küllü Geopolimer beton kullanılarak, istenen işlenebilir sağlanırken beton daha geçirimsiz olmaktadır. Allouche ve Patil tarafından, alkali-silika reaksiyonu düşünüldüğünde, uçucu küllü Geopolimer betonun, Normal Portland çimento esaslı betonla karşılaştırıldığında, Geopolimer betonun alkali-silikaya karşı daha hassas olduğunu belirtmişlerdir.

### 2.6.3. Isı dayanıklılığı

Cüruf esaslı Geopolimerlerin, Normal Portland çimentoları üzerinde bazı avantajları bulunmaktadır. Cüruf esaslı Geopolimer daha yüksek basınç dayanımına sahiptir ve kimyasal ve yüksek sıcaklık direnci Portland çimentosuna göre daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklardaki ısıyı dikkate alarak, uçucu küllü Geopolimer betonlar da kullanılabilir fakat Portland çimentosunda ısıdan dolayı çatlaklar meydana gelebilir. Zuda ve arkadaşları (2006) uçucu kül içeren geopolimer beton ile ilgili birçok çalışma yaparak, Geopolimer betonun istenen basınç dayanımını  $400^\circ\text{C}$ 'ye kadar koruyabildiğini ve bu yüksek sıcaklıkta ısıya karşı iyi bir direnç içeren malzemenin alkali aktivasyona uğramış alüminosilikat malzemesinin olduğunu belirtmiştir. [55]

### 2.6.4. Islanma ve kuruma döngüsü

Islanma ve kuruma döngüsünün betondaki gözenekler boyunca nemin hareketi neden olabileceği söylenir [56]. Betonun gözenekli yapısı nedeniyle, alkaliler, sülfatlar, klorürler ve asitler gibi zararlı maddelerin gözeneklerin içinde birikmesine ve bu zararlı maddelerin hareketine karşı kontrol edebilmesi, betonun maruz kalabileceği bu tür problemlere karşı durabilitesini arttırabilir. Su buharlaşabilir ve betonda zararlı iyonlar ve klorürler gibi

iyonların konsantrasyonunu artırabilir. Betonun kuruması esnasında, çelik korozyonu için gerekli olan oksijenin betonun içine nüfuz ederek korozyonun başlangıcına sebep olur. Bazen oksijen, nemli durumda bulunan betonun gözenekleri doymuş durumda olduğundan oksijenin beton içine nüfuz etmesi zorlaşabilir. Fakat beton kurumaya başlayıp gözenekler daha az doygun hale geldikleri zaman oksijen, betonun içine nüfuz etmeye başlayarak korozyon oluşumu için gerekli oksijenin donatı seviyesine ulaşır. Örneğin, incelenen bazı su altındaki yapılar ile ıslanma-kuruma döngülerine maruz kalan yapılar karşılaştırıldıklarında ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalan yapıların daha çok bozulmaya uğradığı tespit edilmiştir [57].

Normal Portland çimentolu betonun, önemli bir bileşeni olan CaO, asitler ve agresif sülfatlarla reaksiyona girerek betonun daha çok bozulmasına neden olabilir. Özetle, ısı ile sertleşen Geopolimer betonun Portland çimentolu betona göre daha yüksek ıslanma-kuruma direnci ve daha az büzülme gösterdiği belirtilmiştir [58].

## **2.7. Geopolimer Betonun Dayanımını Etkileyen Faktörler**

### **2.7.1. SiO<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O oranı**

Geopolimer beton tasarımında önemli bir parametre SiO<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O oranıdır. Bu oran, alkali-silikat solüsyonunda çözülmüş alkalilerin polimerizasyon derecesini önemli ölçüde etkileyerek sentezlenmiş jel ürününün ve Geopolimer betonun genel mekanik özelliklerini belirlemektedir [59].

### **2.7.2. Geopolimer betonda su miktarı**

Geopolimer betonun dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biri, karışımdaki su miktarıdır[60]. Geopolimer karışımlarına, fazladan su ilave etmek, karışımların işlenebilirliği artırabilir fakat suyun miktarı arttıkça Geopolimer betonun basınç dayanımı azalır [17]. Portland çimentolu betonunun su/çimento bağıntısıyla benzer bir basınç mukavemeti-su ilişkisi bulunmaktadır.

### 2.7.3. Sıcaklık ve kür süresi

Geopolimer beton tasarımındaki en büyük zorluklardan birisi ise numunelerin kür süresi ve sıcaklığının ayarlanmasıdır. Portland çimentolu betonlara benzer bir şekilde, dışarıdan verilen herhangi bir ısı kaynağı, malzemenin alkali reaktivitesini arttırarak mukavemetin artması için gerekli reaksiyona yardımcı olurlar. Yüksek kür sıcaklığı sayesinde Geopolimer betonun erken dayanımında çok büyük artışlar olur [17]. Araştırmalar, daha uzun sertleşme süresinin polimerizasyon sürecini arttırdığını ve bu da gelişmiş bir basınç mukavemetine yol açtığını göstermektedir [17]. Kür sıcaklığının basınç dayanımına pozitif etkisine ek olarak, alkali doygunluğu nedeniyle daha kısa sürede priz alma süreleri de elde edilebilir [60].

### 2.7.4. Sodyum silikat-sodyum hidroksit sıvı oranı

Bir sodyum hidroksit aktivatörünün içerisine sodyum silikatlar eklemek Geopolimer betonun mekanik özelliklerini arttırabilir. Alkali malzemelerin oranları betonun basınç dayanımı ve kimyasal etkilere karşı direnci etkilediğinden alkali malzemelerin oranlarına dikkat etmek gerekir. Yapılan çalışmalarda sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının, Geopolimer betonun mekanik özellikleri ve erken gelişim özellikleri üzerinde önemli bir rol oynayabileceği belirtilmiştir. Sodyum silikat-sodyum hidroksit sıvısının kütle oranı ne kadar yüksekse Geopolimer betonun basınç dayanımı da o kadar yüksektir [61].

### 2.7.5. Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinin konsantrasyonu

Aktifleştirici çözeltinin molaritesi, sodyum hidroksitin konsantrasyon ile belirlenir. Yüksek NaOH ilaveler, CH oluşumu ve kimyasal çözünmeyi hızlandırabilir [62]. CH içeriğinin azaltılmasının, üstün dayanıklılık performansı ile sonuçlandığı bilinmektedir [63]. Burada, sodyum hidroksit çözeltisinin daha yüksek konsantrasyonunun (molarite açısından) Geopolimer betonun daha yüksek basınç dayanımına yol açabileceğini söyleyebiliriz [61]. Aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılması gözenek sıvılarının pH'ını hidrasyon aktivitesini düzenleyebilir ve geopolimerin C-S-H üretiminin ana şeklini doğrudan etkiler. NaOH konsantrasyonu ve ısı üretimi arasında doğrusal olmayan bir orantı vardır [64].

Bu çalışma kapsamında uçucu küllü Geopolimer betonların, cürüflu Geopolimer betonların ve %50 cüruf ve %50 uçucu kül içeren Geopolimer betonların % 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performansları incelenmiş ve sonuçlar Portland çimentosuyla yapılan betonlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmamızdaki amaç, Geopolimer betonların durabilite performanslarını inceleyerek Geopolimer betonların kullanımının bir Standard hale getirilmesi sağlamaya yardımcı olmaktır. Sülfürik asit beton için en tehlikeli asit türlerinden birisi olarak bilindiğinden Geopolimer betonların bu asitlere karşı performansının bilinmesi, ileriki yıllarda kimyasal saldırılara maruz betonların Geopolimer beton olarak inşa edilmesine katkıda bulunacağı açıktır. Bu deney kapsamında üç farklı geopolimer beton ve Portland çimentosu betonu üretilmiş ve yaklaşık 3 ay %5 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır.



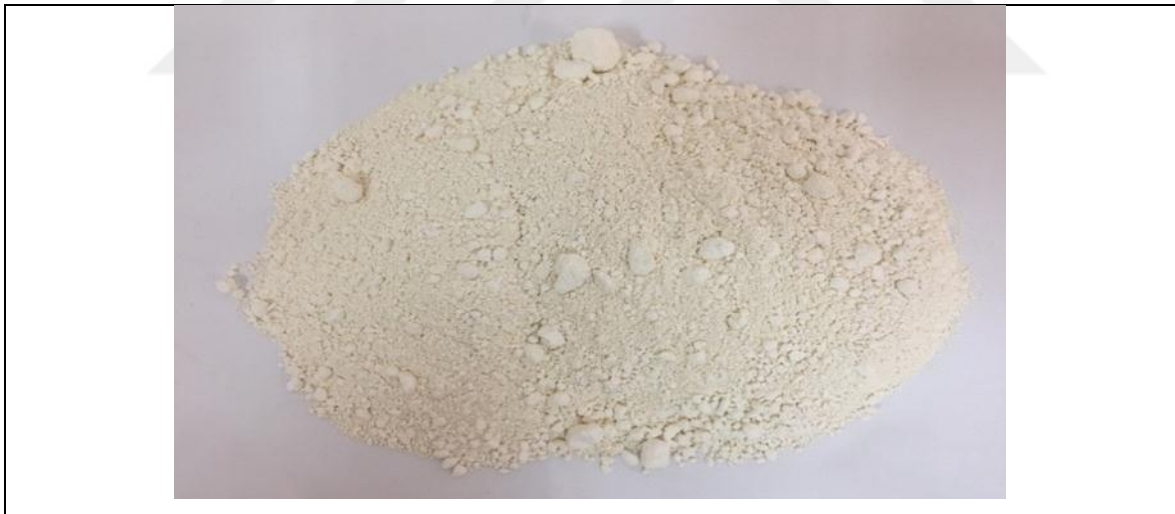
### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde elde edilen numunelerde kullanılan malzemeler ve özellikleri, üretilen geopolimer ve normal portland çimentosu ile elde edilen betonlara uygulanan deneyler ile bu deneylerin yapılışı hakkında bilgi verilmektedir.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

##### 3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu; alümina silikat ve kalsiyum silikat içeren, pürüzsüz ve granül bir yapıya sahip metalik olmayan bir malzemedir. Bu araştırmada kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel bileşimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deneyde kullanılan yüksek fırın cürufu

Çizelge 3.1 Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal analiz	Sonuçlar (%)
CaO	37,92

SiO <sub>2</sub>	37,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,16
MgO	5,64
SO <sub>3</sub>	0,23
K <sub>2</sub> O	0,56
Na <sub>2</sub> O	0,84
Cl	0,0150
S	0,78
TiO <sub>2</sub>	0,66
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55
Kızdırma kaybı	0,01
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,95
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	5131

### 3.1.2. Normal portland çimentosu

Bu çalışmada CEM I 42.5 R çeşidine göre OPC kullanılmıştır. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3.'de çimentonun fiziksel ve kimyasal bileşimini göstermektedir.

Çizelge 3.2 Normal portland çimentosunun mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Erken Dayanım / 2 gün	28,3 MPa
Erken Dayanım / 7 gün	42,1 MPa
Standart Dayanım / 28 gün	54,8 MPa

Çizelge 3.3 Normal portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Bileşen	Değer
CaO	63,67 (%)
SiO <sub>2</sub>	19,63 (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,58 (%)

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,32 (%)
MgO	1,25 (%)
SO <sub>3</sub>	3,23 (%)
K <sub>2</sub> O	0,68 (%)
Na <sub>2</sub> O	0,21 (%)
Cl	0,042 (%)

### 3.1.3. Uçucu kül

Deneyde kullanılan 2,05 g/cm<sup>3</sup> özgül ağırlığa sahip uçucu kül, Türkiye Zonguldaktaki ÇATES ELEKTRİK ÜRETİM A.Ş. tarafından tedarik edildi. Çizelge 3.4'te kullanılan uçucu külün kimyasal ve bazı fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 3.4 Uçucu külün kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri

Malzemeler	Sonuçlar
CaO	1,793 (%)
SiO <sub>2</sub>	56,15 (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,37 (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,444 (%)
MgO	2,350 (%)
SO <sub>3</sub>	0,056 (%)
K <sub>2</sub> O	3,804 (%)
Na <sub>2</sub> O	1,095 (%)
Cl	0,090 (%)
Kızdırma kaybı	2,20 (%)
Özgül ağırlık	2,05 g/cm <sup>3</sup>



### 3.1.4. Agregalar

Çalışma kapsamında, kaba ve ince agrega olarak kullanılmıştır. Kaba agrega büyüklüğü 11 mm ile 4 mm arasında ve ince agrega şekilde gösterildiği gibi 4 mm'den küçük kullanılmıştır. Çizelge 3.5'da agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri belirtilmiştir.



Şekil 3.2 Deneyde kullanılan agregalar (a) kaba agrega (b) ince agrega

Çizelge 3.5 Agregaların fiziksel ve mekaniksel özellikleri

Özellikler	1 nolu agrega	2 nolu agrega
Tane yoğunluğu	$2,71 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$	$2,72 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$
Su emme oranı	%0,7	%0,6
Yassılık endeksi	%14,0	%9,0
İri agregaların parçalanmaya karşı direnci	%20	%20

### 3.1.5. Alkali aktivatörler

Mevcut çalışmamızda, alkali aktivatörler bir sodyum hidroksit ve sodyum silikat sıvısı karışımı ile oluşturulmuştur. Sodyum bazlı alkaliler, potasyum tabanlı olanlardan daha ekonomik olduğundan deneyde kullanılmıştır. Bu araştırmada % 97-98 saflıkta NaOH

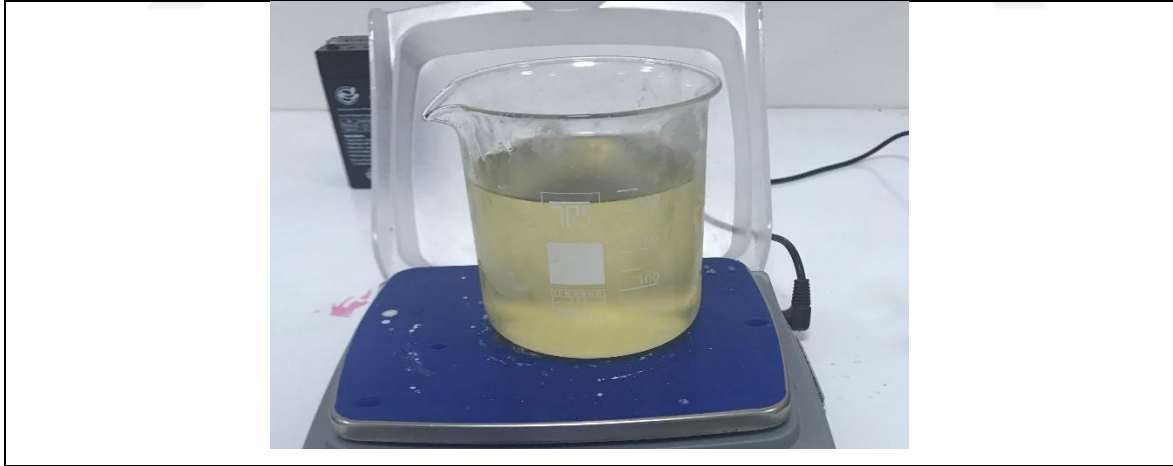
kullanılmıştır ve karıştırmadan en az 6 saat önce suda eritilmiştir. Temin edilen Sodyum silikat aktivatörünün ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) özellikleri Çizelge 3.6'de yazılmıştır.

Çizelge 3.6 Sodyum silikatın kimyasal bileşimi ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

Bileşen	Değer
% $\text{SiO}_2$	%22-25
% $\text{NaO}_2$	% 10-12
Yoğunluk	1,39 g/cm <sup>3</sup>
Görünüm	Renksiz,belirsiz, viskoz sıvı

### 3.1.6. Kimyasal katkı

Yüksek Fırın cüruf geopolimer harcının kullanılabilirliğini kimyasal katkı ekleyerek geliştirildi ve Şekil 3.3 de gösterilmiştir. Çizelge 3.7 de katkı malzemesinin kimyasal özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.3 Deneyde kullanılan kimyasal katkı

Çizelge 3.7 Kimyasal katkının özellikleri

Özellikler	Kimyasal katkı

Ürün adı	YAPRHEO HYPER SCC 900
Renk	Opak
Durumu	Sıvı
Özgül ağırlık	1,069 g/cm <sup>3</sup>
Katı madde ağırlığı	31,93 %
Suda çözünebilir klorür	0,0376 %
pH değeri	6,03

### 3.2. Deneysel Çalışma

#### 3.2.1 Kalıplar

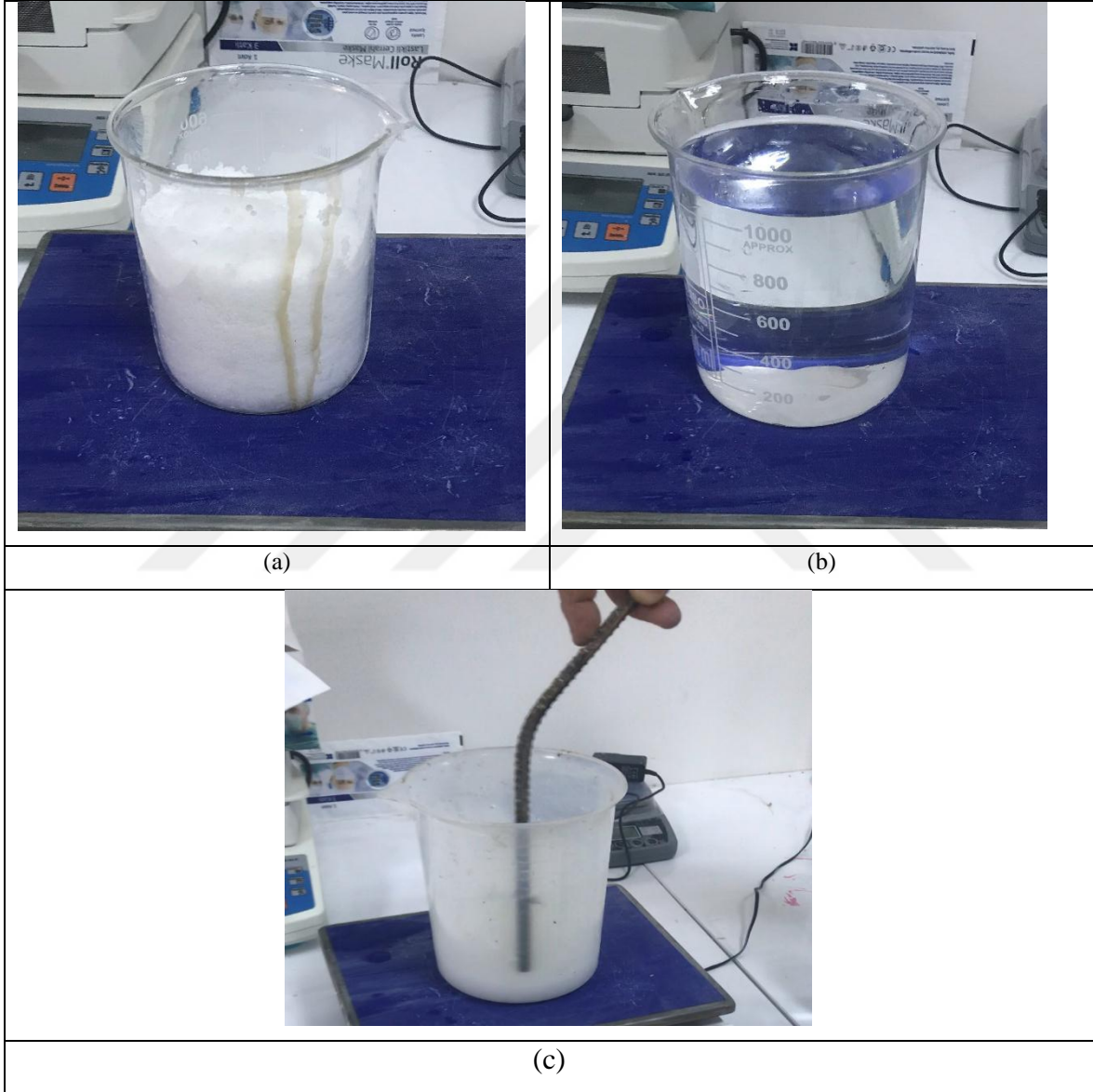
Deneyde, küp kalıp (150X150X150) mm ve silindir kalıp (100X200) mm kullanılmıştır. Kalıplar Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Kalıp çeşitleri; deneyde kullanılan küp ve silindir kalıplar

### 3.2.2. Alkali aktivatörlerin hazırlanması

Deneyde kullanılan alkali aktivatörleri; Sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri karıştırıldı. Sodyum hidroksit, 1482 gr NaOH çözeltisi elde etmek için, 525 gr NaOH ve 957 gr su kullanılarak elde edilmiştir. Alkali çözelti, betonun dökülmesinden önce hazırlandı.



Şekil 3.5 Alkali çözelti hazırlanması

### 3.2.3. Karışım hazırlanması

Geopolimer beton, çimento yerine cüruf, uçucu kül gibi malzemelerden oluşan ve su yerine alkali sıvılar (Sodyum silikat ve Sodyum hidroksit veya Potasyum silikat ve Potasyum hidroksit) eklenerek yapılan bir betondur. Çizelge 3.8 de geopolimer betonun hazırlama sürecini göstermektedir.

Çizelge 3.8 Geopolimer beton hazırlama süreci

Sodyum Silikat	+	Sodyum Hidroksit	=	Alkali Aktivatör
Agrega+ uçucu kül veya cüruf	+	Alkali aktivatör + kimyasal katkı	=	Geopolimer beton

Çizelge 3.9 Geopolimer (yüksek fırın cürufu) karışım hesapları

Malzeme		Karışım oranı (1 m <sup>3</sup> için)
Agrega	Kaba agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
	İnce agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
Kum	Kum 1	373 kg/m <sup>3</sup>
	Kum 2	373 kg/m <sup>3</sup>
Yüksek fırın cürufu		360 kg/m <sup>3</sup>
Kimyasal katkı		6 kg/m <sup>3</sup>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH		115.7/46.3 =2.5
48 saatlik fırın kürü		70 °C
İlave Su		37.5 kg/m <sup>3</sup>

Çizelge 3.10 Geopolimer (uçucu kül) karışım hesapları

Malzeme	Karışım oranı
---------	---------------

Agrega	Kaba agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
	İnce agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
Kum	Kum 1	373 kg/m <sup>3</sup>
	Kum 2	373 kg/m <sup>3</sup>
Uçucu kül		360 kg/m <sup>3</sup>
Kimyasal katkı		6 kg/m <sup>3</sup>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH		115.7/46.3 =2.5
48 saatlik fırın kürü		70 °C
İlave Su		25 kg/m <sup>3</sup>

Çizelge 3.11 Geopolimer (uçucu kül ve cüruf) karışım hesapları

Malzeme		Karışım oranı
Agrega	Kaba agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
	İnce agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
Kum	Kum 1	373 kg/m <sup>3</sup>
	Kum 2	373 kg/m <sup>3</sup>
Uçucu kül		180 kg/m <sup>3</sup>
Cüruf		180 kg/m <sup>3</sup>
Kimyasal katkı		6 kg/m <sup>3</sup>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH		115.7/46.3 =2.5
48 saatlik fırın kürü		70 °C
İlave Su		31.25 kg/m <sup>3</sup>

Çizelge 3.12 Çimentolu beton(OPC) karışım hesapları

Malzeme		Karışım oranı
Agrega	Kaba agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
	İnce agrega	560 kg/m <sup>3</sup>
Kum	Kum 1	373 kg/m <sup>3</sup>



	Kum 2	373 kg/m <sup>3</sup>
Su		162 kg/m <sup>3</sup>
Çimento		360 kg/m <sup>3</sup>
Kimyasal katkı		6 kg/m <sup>3</sup>

### 3.2.4. Geopolimer beton yapılışı ve dökümü

Geopolimer beton karışımlarının üretimi için temel süreç, standart karıştırma methodu kullanılmıştır. Agregalar, doymuş yüzey olarak kullanılır. İlk olarak, her iki agrega geopolimer beton yapılması için eklendi. İkinci olarak, iki çeşit olan kum kazana eklenip kuru malzemelere sodyum silikat ve sodyum hidroksit içeren alkali sıvı ilave edildi ve karıştırılmaya devam edildi. Sonrasında, kül kalıplara ve silindir kalıplara döküldü. Daha sonra, kalıplar sıkıştırılıp, hava boşluklarını ortadan kaldırmak için titreşim yapıldı. Dökümden sonra kalıplar, şekillerde gösterildiği gibi bir dinlenme süresi olarak 48 saat alkali çözeltinin buharlaşmasını önlemek için plastik torbalar kullanılarak kaplanmıştır. Şekil 3.6 de süreç gösterilmiştir.





(c)



(d)

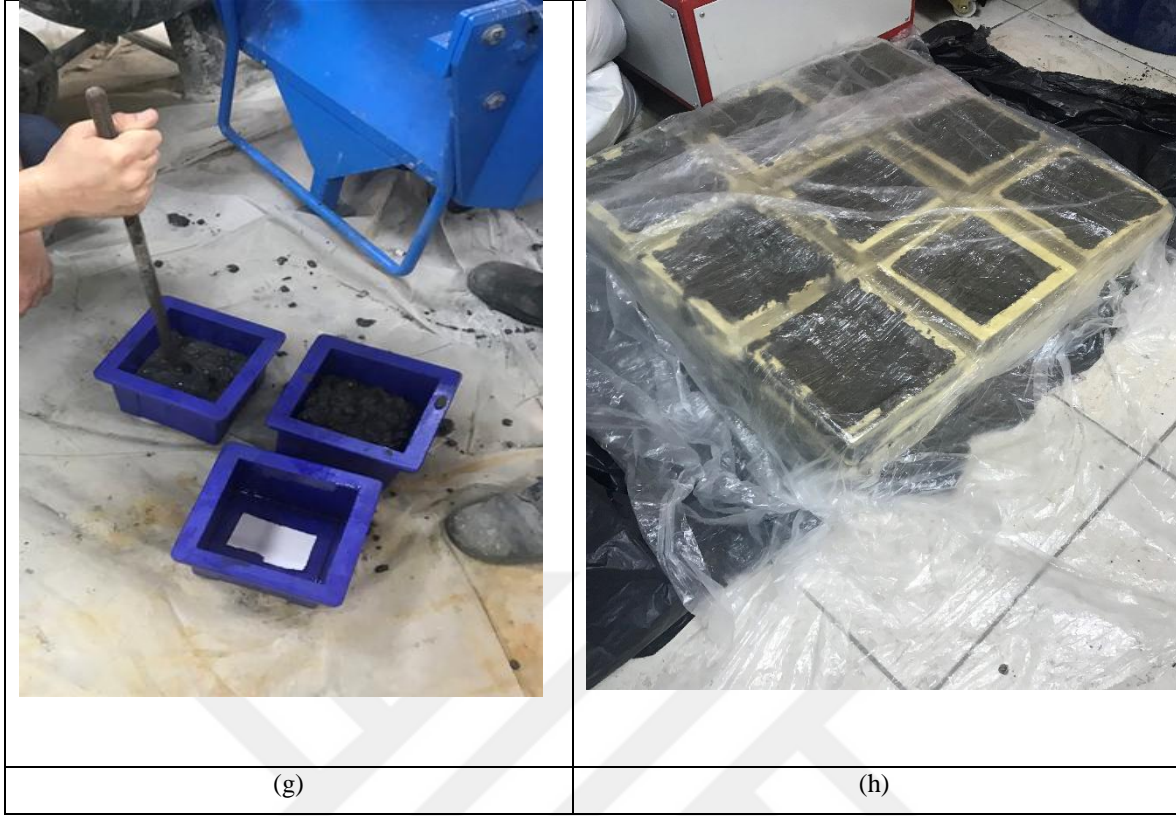


(e)



(f)

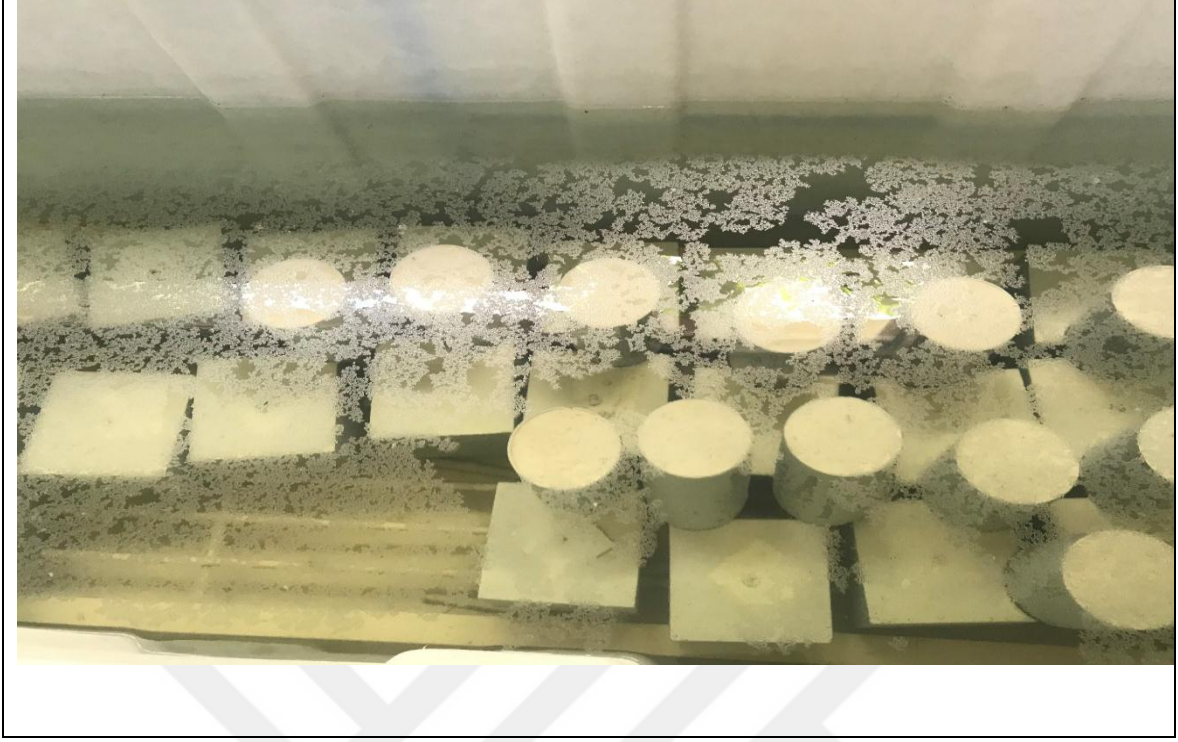




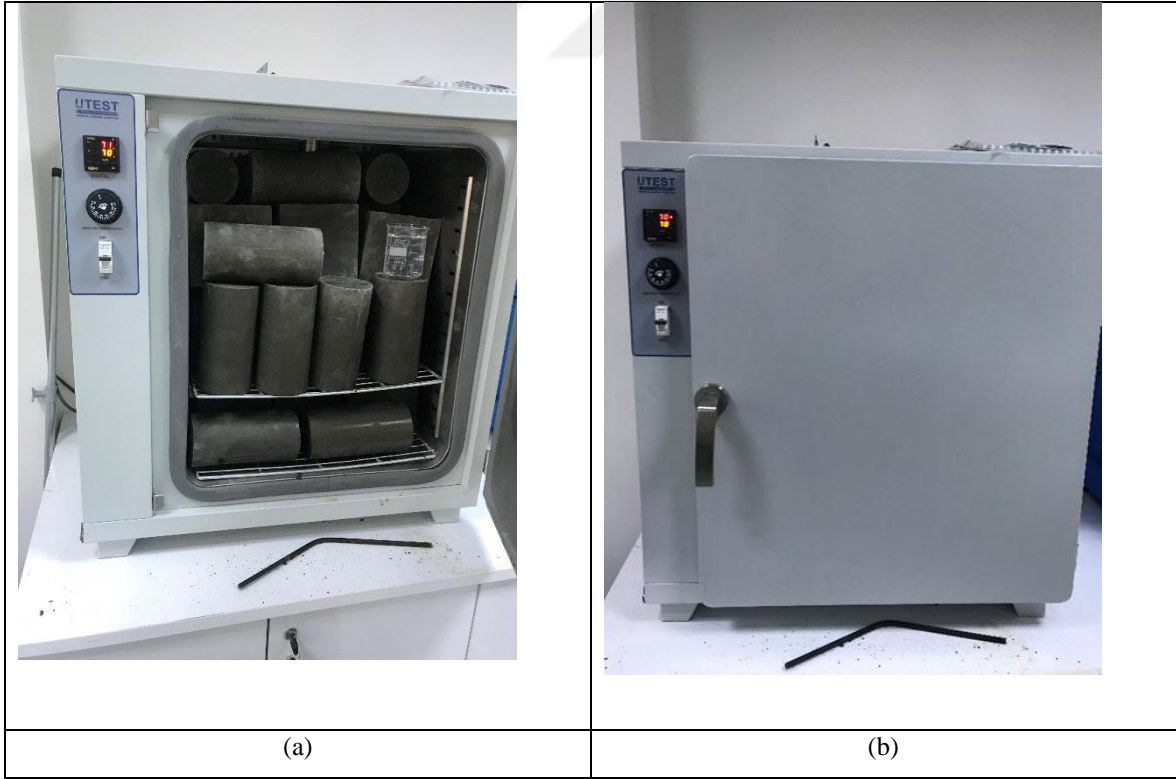
Şekil 3.6 Beton numunelerin döküm aşaması

### 3.2.5. Kürleme

Beton numuneler 48 saat sonra oda sıcaklıkta dinlenme süresinden sonra açıldı ve geopolimer beton numuneler 48 saat  $70^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta fırımlandı. Normal portland çimentolu beton numuneleri 28 gün boyunca suda kürlenir. Yüksek fırın cürufu veya uçucu küllerin kütle ve alkali sıvıların oranı ve aynı zamanda kürlenme sıcaklığı gibi birçok faktör geopolimer betonun gücünü etkiledi. Sertleşme sıcaklığı arttıkça, beton dayanımı azalır. Kürleme yöntemi sırasında sıcaklık yükseldikçe, geopolimer beton numunelerinde polimerizasyon daha hızlı hale gelir ve beton 3 ila 4 saatlik bir ısıtma süresinde gücünün % 70'ini alabilir [80]. Geopolimer betonlar da su kürü yerine sadece sıcaklıkla kürlenmesi gerekir.



Şekil 3.7 Normal portland çimentolu beton numunelerin kürlenmesi



Şekil 3.8 Geopolimer beton numunelerin 70°C fırında kürlenmesi

### 3.2.6. Sülfürük asit çözeltisinin hazırlanması

Geopolimer beton numuneleri %5 sülfürük asit içeren sularda 56 ve 90 gün şekil 3.9 da gösterildiği gibi bekletildi.



Şekil 3.9 %5 Sülfürük asit çözeltisinde bekletilen numuneler

### 3.2.7. Ağırlık değişimi

İlk olarak, sıvılara maruz bırakılmadan önce numunelerin ağırlığı ölçülmüştür. Burada, doymuş yüzeydeki ve kuru durumdaki ağırlığı başlangıç ağırlığı olarak alınmıştır. Sülfürük asite maruz bırakılan 56 ve 90 günlük numuneler tek tek ölçülüp ilk ağırlıkları ile karşılaştırılmıştır. Ağırlığın değişimi aşağıdaki formülle hesaplandı.



Ağırlıkta yüzde değişimi  $= [(B-A)/A] \times 100$

(3.1)

A= Başlangıç Ağırlığı

B= Aside maruz kaldıktan sonraki Ağırlığı



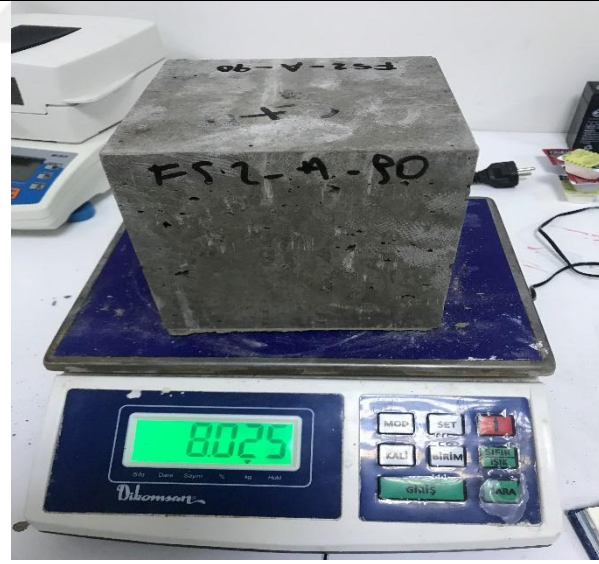
(a)



(b)



(c)



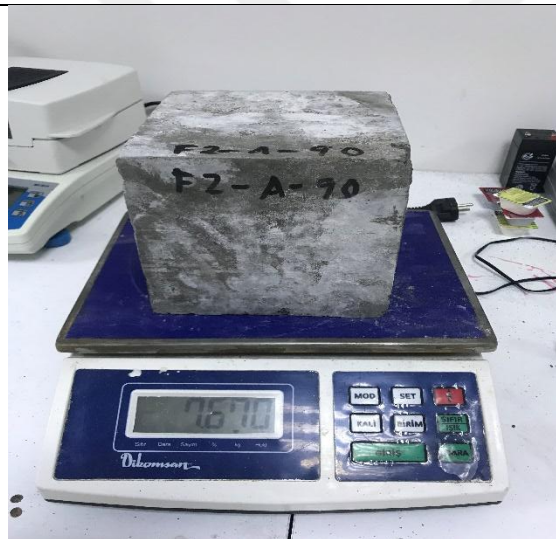
(d)



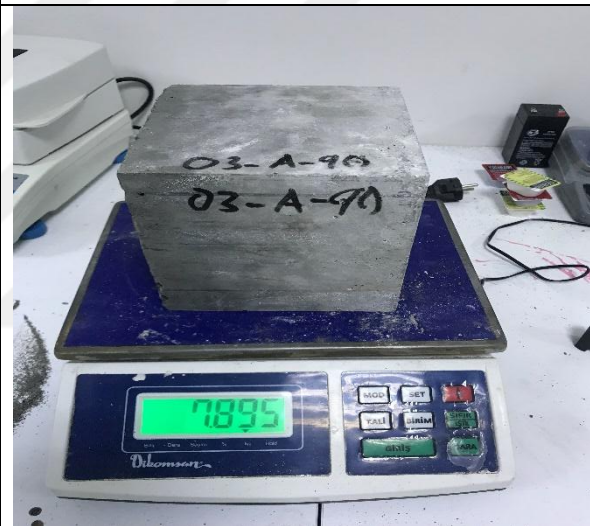
(e)



(f)



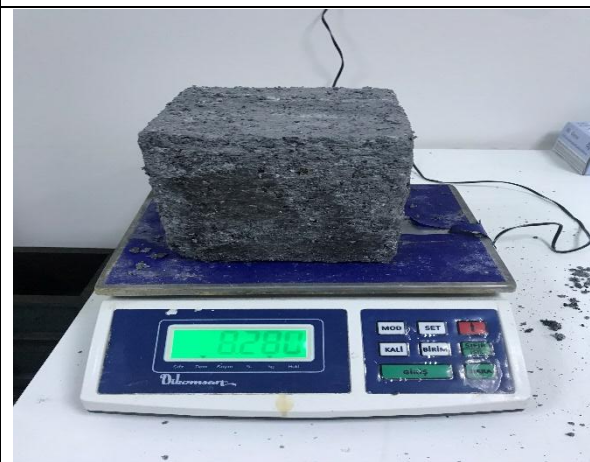
(g)



(h)

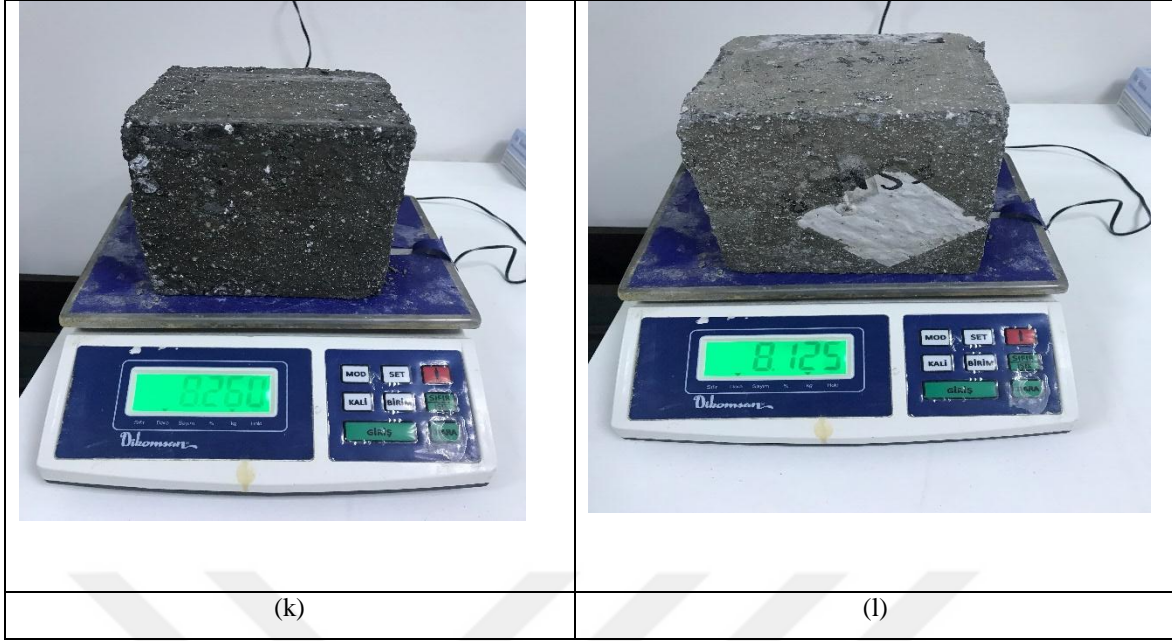


(i)



(j)





Şekil 3. 10 Elde edilen numunelerin normal ortam ve asidik ortamda bekletilip kütle değişimi

### 3.2.8 Basınç dayanımı testi

Basınç dayanımı testi, betonun özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Betonun tüm özellikleri her zaman basınç dayanımı ile ilişkilidir ve bazı mekanik özelliklerde kullanılabilir. Ek olarak, basınç dayanımı deneyleri AS1012.9-1999'a göre gerçekleştirilmiştir. Maksimum 2000 kN kapasiteli bir test makinesi kullanıldı ve şekil 3.11'de gösterilmiştir. Test 28-56 ve 90 günlük sürede gerçekleştirilmiş ve test sonuçları kontrol betonu örnekleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. 11 Basınç dayanım test örneği

### 3.2.9 Yarma testi

Yarma mukavemeti; bir malzemenin, onu parçalara ayırabilecek bir kuvveti tolere edebilmesi olarak bilinir ve bu da betonun önemli özelliklerinden biridir. Betonun, düşük gerilimi ve doğada gevrek olması nedeniyle doğrudan gerilmeye direnmesi beklenmemektedir. Bununla birlikte, betonun gerilimde başarısız olduğu yükü belirlemek için betonun çekme mukavemetinin ölçülmesi gerekmektedir.

Yarma testi, hem kontrol hem de geopolimer beton numuneleri için 28, 56 ve 90 günde uygulandı. Şekil 3.12 ' de görüldüğü gibi, test makinesine numune konulmuştur.



Şekil 3. 12 Silindir numunelerde yarma testi



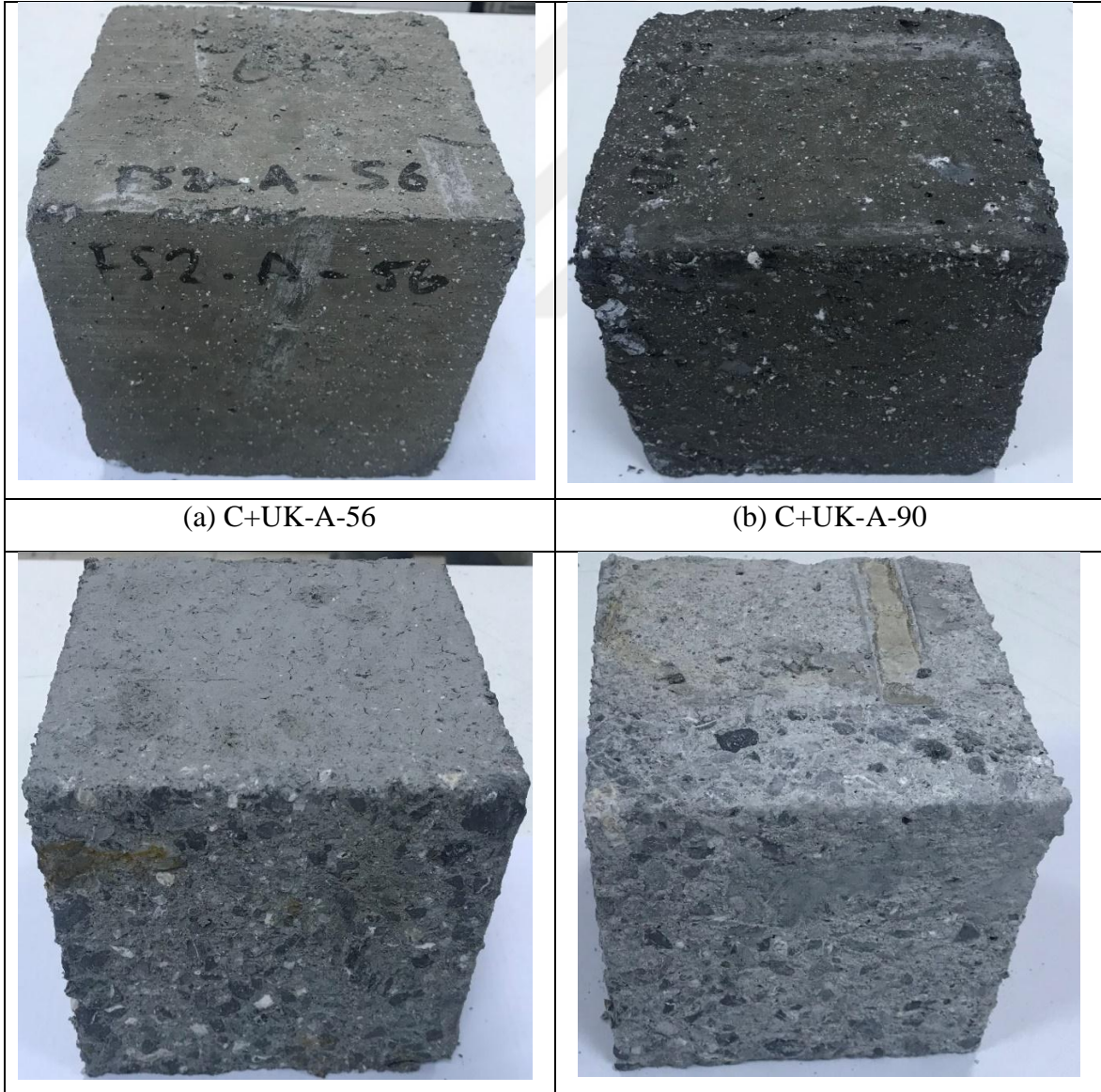
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

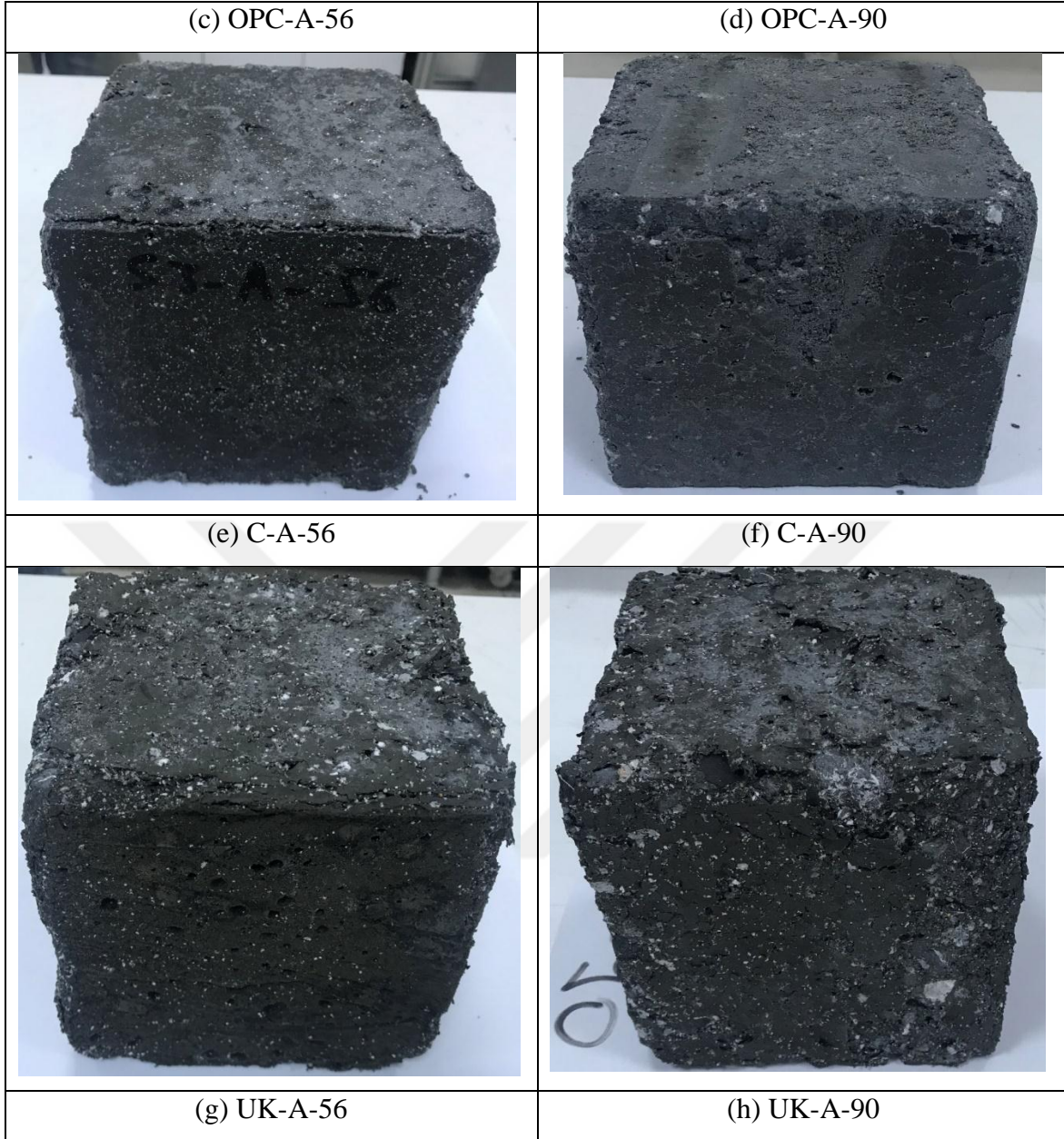
Bu çalışmada %5 sülfürik asit etkisindeki farklı geopolimer ve normal çimentolu betonların performansı incelenmiştir. Kimyasal etki dolayısıyla numunelerde oluşan görsel değişim, ağırlık değişimi ve basınç dayanımındaki değişim detaylıca incelenmiştir. Bu bölümde normal Portland çimentolu betonun, %100 yüksek fırın cürufllu Geopolimer betonun, %100 uçucu küllü Geopolimer betonun, ve %50 uçucu küllü ve %50 cürufllu Geopolimer betonun deney sonuçları tartışılmıştır.

### 4.1. Görsel Denetim

Portland çimentolu beton (OPC), cürufllu Geopolimer betonların (C), uçucu küllü Geopolimer betonların (UK), ve hem uçucu küllü hem de cürufllu Geopolimer betonların (C+UK) hava ortamında ve %5 sülfürik asit ortamlarında 56. ve 90. günlerdeki (28 ve 56 gün asit ortamına maruz bırakılmış) betonların yüzeylerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.1'de verilmiştir. Sülfürik asite maruz kalan betonların dış yüzeyleri incelendiğinde, yüzeylerde etrenjit ve alçıtaşı oluşmasından kaynaklanan beyaz lekeler ve yüzey bozulması gözükmemektedir. Asit içerisine daldırılan numunelerin yüzeyindeki erozyon, kalsiyum monosülfoalüminatlar ve kalsiyum hidroksit arasındaki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle meydana gelen beyaz bir alçı kristalleri tabakasından kaynaklanmaktadır. Bu oluşan etrenjit ve alçıtaşı ürünleri betonun dış yüzeyin yumuşama nedeniyle pul pul dökülmesine (yüzey erozyonu) ve mekanik dayanımın düşmesine neden olmaktadır. Şekil 4.1 detaylıca incelendiğinde betonun dış yüzeyindeki bozulmanın zamanla arttığı gözlemlenmektedir. Yani betonun 90.gündeki yüzey bozulması 56.günden daha fazladır. Beton performansları incelendiğinde en çok bozulma uçucu küllü Geopolimer beton numunelerde gözükmemektedir. Uçucu küllü Geopolimer betonlarda çok fazla dökülme, kabarma ve beyaz lekeler mevcuttur. Cürufllu Geopolimer betonda ise kısmi dökülmeler ve uçucu küllü betona göre görsel olarak daha az beyaz leke mevcuttur. Ordinary Portland çimentosu (OPC) betonu ise yüzeyde dökülme mevcuttur ve betonun rengi gri renkten beyaz renge dönüşmüştür. Hem uçucu küllü (%50 UK) hem de cürufllu (%50C) Geopolimer betonda ise yüzeyde beyaz lekeler mevcuttur fakat dökülme yoktur veya yok denecek kadar azdır. %50 uçucu küllü ve %50 cürufllu içeren Geopolimer betonu görsel olarak sülfürik asite karşı en iyi durabilite gösterirken, %100 uçucu küllü Geopolimer beton ise asit etkisine karşı en kötü durabilite performansı

göstermiştir. OPC betonu ile cüruf içeren Geopolimer betonların bozulması yüksek miktarda CaO'den dolayı kaynaklanmaktadır. Uçucu küllü betonda ise en iyi durabilite performansı (çok düşük CaO içermesinden dolayı) beklenirken en kötü performansı göstermiştir. Bunun nedeni olarak, düşük miktarlardaki uçucu kül içeren betonlarda hidrate olmamış uçucu kül parçacıklarından dolayı geçirimsizliğin fazla olması neden olarak gösterilebilir. Fakat kalsiyum bakımından zengin numunelerde (%50 cüruf ve %50 uçucu kül) uçucu külün ince olmasından dolayı arayüzeyi güçlendirerek geçirimsizliği azaltması betonun durabilite performansını olumlu yönde etkilemiştir. Bunun yanında düşük CaO içeriğinden dolayı betonda etrenjit ve alçıtaşı oluşumundan kaynaklanan bozulmanın daha az olması beklenmektedir.





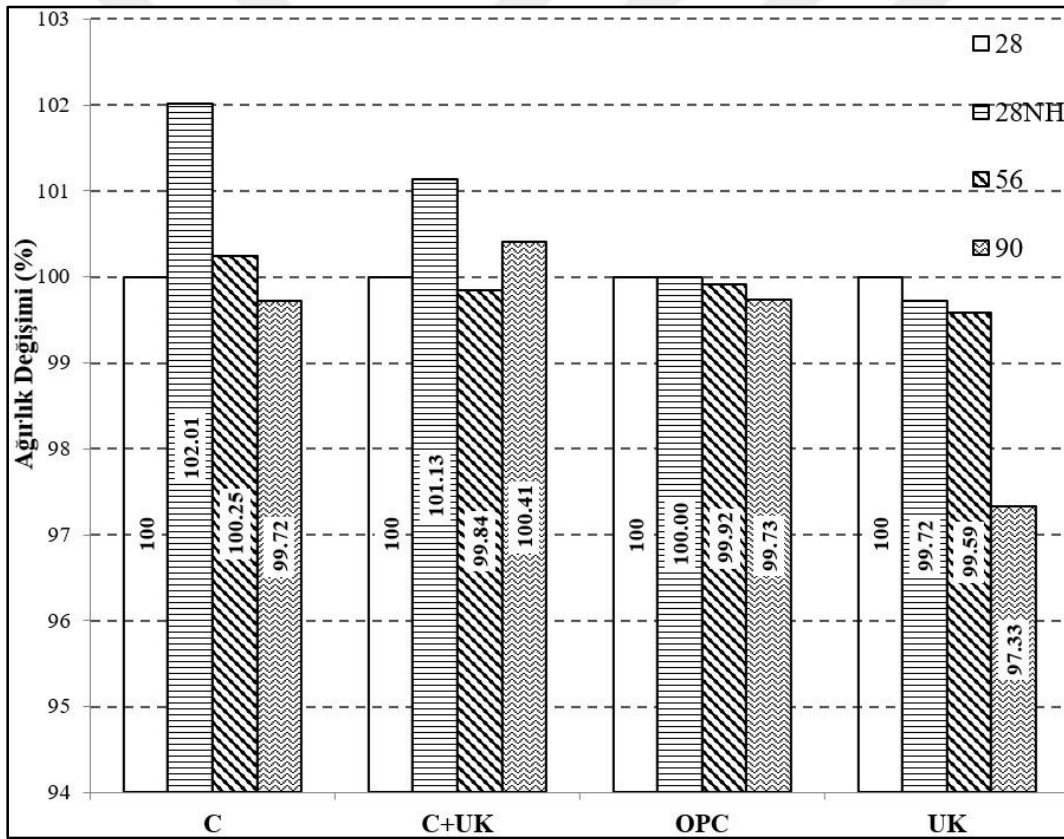
Şekil 4.1 %5 Sülfürik asite maruz kalan numunelerin yüzeysel değişiminin görsel incelenmesi

#### 4.2. Ağırlık Değişimi

Portland çimentolu numuneler, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, ve yüksek fırın cürufu ile uçucu kül karışımından elde edilen geopolimer beton numunelerin normal (hava) ortamında ve %5 sülfürik aside maruz kaldığı ortamlardaki ağırlık değişimleri 28 gün, 56 gün ve 90 gün olarak tek tek ölçülüp Şekil 4.2 de değişimi gösterilmiştir. Küp numunelerin hem kontrol

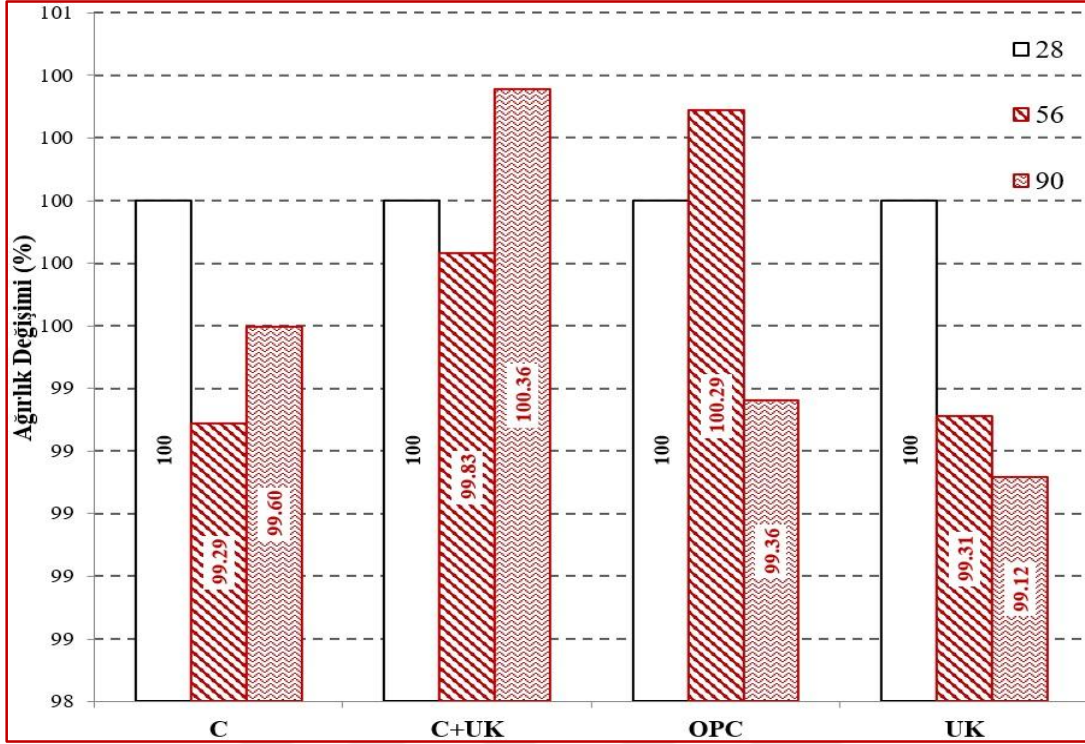
hem de asit ortamındaki ağırlık değişimleri incelenirken, silindir numunelerin 56. ve 90.günlerdeki kontrol numuneleri olmadığı için sadece asit ortamındaki ağırlık değişimleri incelenmiştir. Her beton ağırlığı üç numune ağırlığının ortalamasını göstermektedir.

Şekil 4.2.a' da hava ortamındaki ağırlık değişimleri incelendiğinde, devam eden hidrasyon reaksiyonlarından dolayı numune ağırlıklarında azalma meydana gelmiştir. En fazla ağırlık azalması (~%3) ile uçucu küllü numunelerde gerçekleşmiştir. Buradan uçucu küllü numunelerde hidrasyon reaksiyonların 90.güne kadar devam ettiği ortaya çıkmıştır. Diğer numunelerde ise hidrasyon reaksiyonlarının neredeyse tamamlanmış olduğu, 28.gün ile 90.gün arasındaki ağırlık farkının (~% 0.3) az olmasından anlaşılmaktadır.

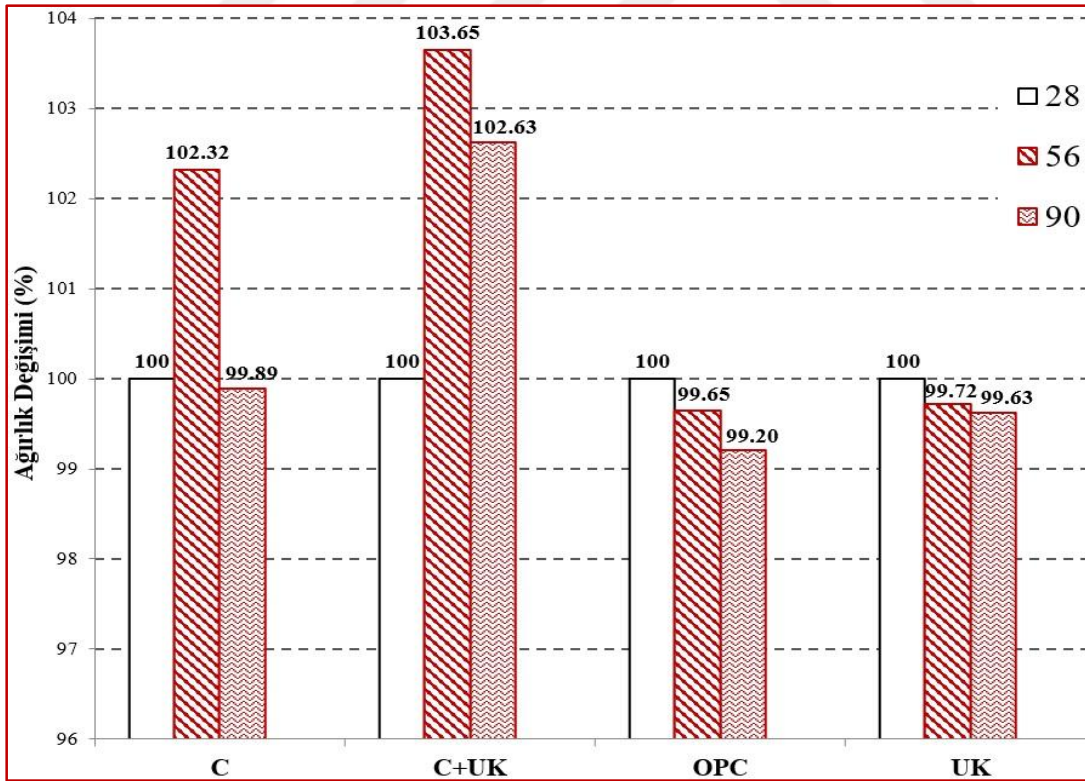


a) Normal (hava) ortamındaki küp numunelerinin ağırlık değişimi





b) Sülfürik asit ortamındaki küp numunelerinin ağırlık değişimi



c) Sülfürik asit ortamındaki silindir numunelerinin ağırlık değişimi

Şekil 4. 2 Numunelerin hava ve sülfürik asit ortamında ağırlık değişimi

Şekil 4.2.b’de küp numunelerin sülfürik asit ortamındaki ağırlık değişimleri incelendiğinde, bazı numunelerin sülfürik asit solüsyonunu içine çektiği için ağırlıklarında artma meydana geldiği, bazı numunelerde ise asit dolayısıyla numune erozyonu gerçekleştiği için numune ağırlığında azalma meydana gelmiştir. Uçucu küllü Geopolimer numunelerin asit dolayısıyla 56.gün ve 90.gün ağırlıklarında sürekli azalma meydana gelirken 90.gün sonundaki ağırlığı 28.gün ağırlığına göre yaklaşık %1 azalmıştır. OPC betonu numunelerinin ağırlıkları 56.günde asit emiliminden dolayı artarken, 90.günde beton yüzeyinin erozyonundan dolayı numunelerin ağırlıklarında azalma meydana gelmiştir. Cürufli Geopolimer numunelerin ağırlıklarında ise azalma meydana gelmiştir. 90.günde cürufli Geopolimer numunelerin ağırlıklarında 28.güne göre meydana gelen azalma yaklaşık %0.5 civarındadır. %50 cüruf ve %50 uçucu kül içeren Geopolimer numunelerin ağırlığı 56.günde çok az miktarda azalırken 90. gün ağırlıklarında ise yaklaşık %0.4 civarında asit emiliminden dolayı ağırlık kazancı meydana gelmiştir. Hem uçucu kül hem de cüruf içeren Geopolimer numunelerde beton erozyonu gözlemlenmemiştir. Benzer sonuç görsel inceleme sonuçlarında da gözükmemektedir.

Şekil 4.2.c’de silindir numunelerin %5 sülfürik asit etkisinde ağırlık değişimi incelendiğinde, 90. gün sonunda en fazla ağırlık değişiminin (~ %0.8) olduğu betonun OPC betonu olduğu, daha sonra uçucu küllü geopolimer beton olduğu (~ %0.4) ve cürufli geopolimer betonun olduğu (~ %0.1) gözlemlenmiştir. Hem uçucu kül hem de cüruf içeren Geopolimer betonlarda da küp numunelerde olduğu gibi asit emiliminden dolayı ağırlık artışı meydana gelmiştir. Küp numunelerle ile silindir numunelerdeki ağırlık değişimleri karşılaştırıldığında küp numunelerin yüzey alanının daha fazla olmasından dolayı küp numunelerdeki ağırlık değişimi daha fazla olmuştur. Bu yüzden asit etkisinden dolayı oluşan bozulma beton numunelerinin yüzey alanıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.

### **4.3 Geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık testi**

#### **4.3.1. Basınç dayanımı**

Cürufli, uçucu küllü, hem uçucu küllü hem de cürufli Geopolimer betonların ve Portland çimentosuyla üretilen betonların hava ve sülfürik asit ortamlarında basınç dayanımlarındaki değişim Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Şekil 4.3’de gösterilen numunelerin basınç dayanımları,

her tip beton için üç adet küp numune basınç dayanımının ortalamasını göstermektedir. Küp numunelerin basınç dayanım testleri 28.günde, 56.günde ve 90.günde yapılmış olup, numunelerin bazıları kontrol (hava) ortamında bekletilip test edilirken, diğer numuneler ise 5% sülfürik asit çözeltisinde bekletildikten sonra basınç testine tabii tutulmuştur. Sülfürik asit sonrası numuneler 24 saat önce laboratuvar ortamında kurutulmaya başlanmıştır ve numuneler kuruduktan sonra basınç testi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.3.a' da hava ortamında bekeletilen küp numunelerin 28., 56. ve 90. günlerdeki basınç dayanım test sonuçları gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, ısı kürü uygulanmış %100 cüruf içeren Geopolimer numunelerin 28., 56. ve 90. gündeki basınç dayanımları sırasıyla 78.34 MPa, 83.32 MPa, ve 84.12 MPa olarak bulunmuştur. Cürufllu numunelerin 56. ve 90. Günlerdeki basınç dayanımları 28.güne göre kıyaslandığında %6 ve %7 artış gözlemlenmiştir. Cürufllu Geopolimer betonların ısı kürü uygulanmadan hava ortamında bekletilerek kürlenmesi durumunda 28. gündeki basınç dayanımı 74.77 MPa bulunmuştur. 28.gündeki beton dayanımları karşılaştırıldığında ısı kürü uygulanan beton ısı kürü uygulanmayan betondan %5 daha fazla dayanım göstermiştir. Sonuçlara göre cüruf içeren Geopolimer betonların ısı kürüne ihtiyaç duymadığı ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.3.a %50 uçucu kül ve %50 cüruf içeren Geopolimer betonların hava ortamında basınç dayanım sonuçlarına göre, ısı kürü uygulanmış %50 uçucu küllü ve %50 cürufllu Geopolimer numunelerin 28., 56. ve 90. gündeki basınç dayanımları sırasıyla 71.61 MPa, 70.36 MPa, ve 71.69 MPa olarak elde edilmiştir. Uçucu küllü ve cürufllu numunelerin 56. ve 90.günlerdeki basınç dayanımları 28.güne göre karşılaştırıldığında basınç dayanım sonuçlarının hemem hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu durum bu Geopolimer numuneleri için hidratasyon olaylarının 28.günde tamamlandığını göstermektedir. Uçucu küllü ve cürufllu Geopolimer numunelerin 28.gündeki beton dayanımları karşılaştırıldığında ısı kürü uygulanan beton ısı kürü uygulanmayan betondan %24 daha fazla dayanım göstermiştir. Bu durum %50 uçucu küllü ve %50 cürufllu Geopolimer betonlarda ısı kürünün basınç dayanımı gelişimi için önemini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.3.a Portland çimentosuyla (OPC) üretilen betonların basınç dayanımları sonuçları karşılaştırıldığında OPC numunelerinin 28., 56. ve 90.gündeki absinç dayanımları sırasıyla 49.58 MPa, 55.55 MPa, ve 58.55 MPa olarak elde edilmiştir. OPC numunelerin 56.ve 90.günde basınç dayanım artışları 28.güne göre %12 ve %18 olarak elde edilmiştir.

Sonuçlara göre OPC betonun basınç dayanımı zamanla artmaktadır. Bu numunelerde ısı kürü uygulanmamıştır.

Şekil 4.3.a %100 uçucu kül içeren Geopolimer betonların hava ortamındaki basınç dayanım sonuçlarına göre, ısı kürü uygulanmış Geopolimer betonların 28., 56. ve 90.gündeki basınç dayanımları sırasıyla 22.36 MPa, 23.55 MPa, ve 24.31 MPa bulunmuştur. Isı kürü uygulanmış uçucu küllü Geopolimer betonların 56.ve 90.gündeki basınç dayanımları 28.güne göre sırasıyla %5 ve %9 artmıştır. Sonuçlar ısı kürü uygulanan betonlarda hidrasyon olaylarının devam ettiğini göstermektedir. Isı kürü uygulanan numuneler ısı kürü uygulanmayan numunelerle karşılaştırıldığında, 28.gündeki basınç dayanım farkı ısı kürü uygulanan betonlarda %28 daha fazladır. Bu da uçucu küllü Geopolimer betonlarda ısı kürünün önemini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.3.a'daki sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek dayanım %100 cürüflü Geopolimer numunelerde, sonra %50 cüruf ve %50 uçucu kül içeren numunelerde, daha sonra Portland çimentosuyla üretilen betonlarda, en düşük ise uçucu küllü Geopolimer betonlarda elde edilmiştir.

Şekil 4.3.b'de ise sülfürik asit etkisindeki değişik beton numunelerin zamanla basınç dayanımlarda meydana gelen değişim gösterilmiştir. Burada sadece ısı kürü uygulanan numuneler sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. Isı kürü uygulanmayan numunelerdeki amacımız ısı etkisiyle farklı tip Geopolimer numunelerin basınç dayanımı gelişimi irdelenmiştir. Sonuçlara göre ısı kürü uygulanan numunelerin 28.gündeki küv sonrası basınç dayanımı 78.34 MPa iken 56. günde (28 gün asite maruz) ve 90.gündeki (62 gün asite maruz) basınç dayanımları sırasıyla 62.83 MPa ve 45.15 MPa olmuştur. 56. ve 90. günlerdeki basınç dayanımları 28.güne göre karşılaştırıldığında numunelerin basınç dayanımı sülfürik asit nedeniyle %20 ve %42 azalmıştır.

Şekil 4.3.b'de %50 uçucu kül ve %50 cüruf içeren ısı kürü uygulanmış Geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde basınç dayanımları 28., 56., ve 90. günlerde sırasıyla 71.61 MPa, 56.78 MPa, ve 52.12 MPa olarak elde edilmiştir. Hem cüruf hem de uçucu kül

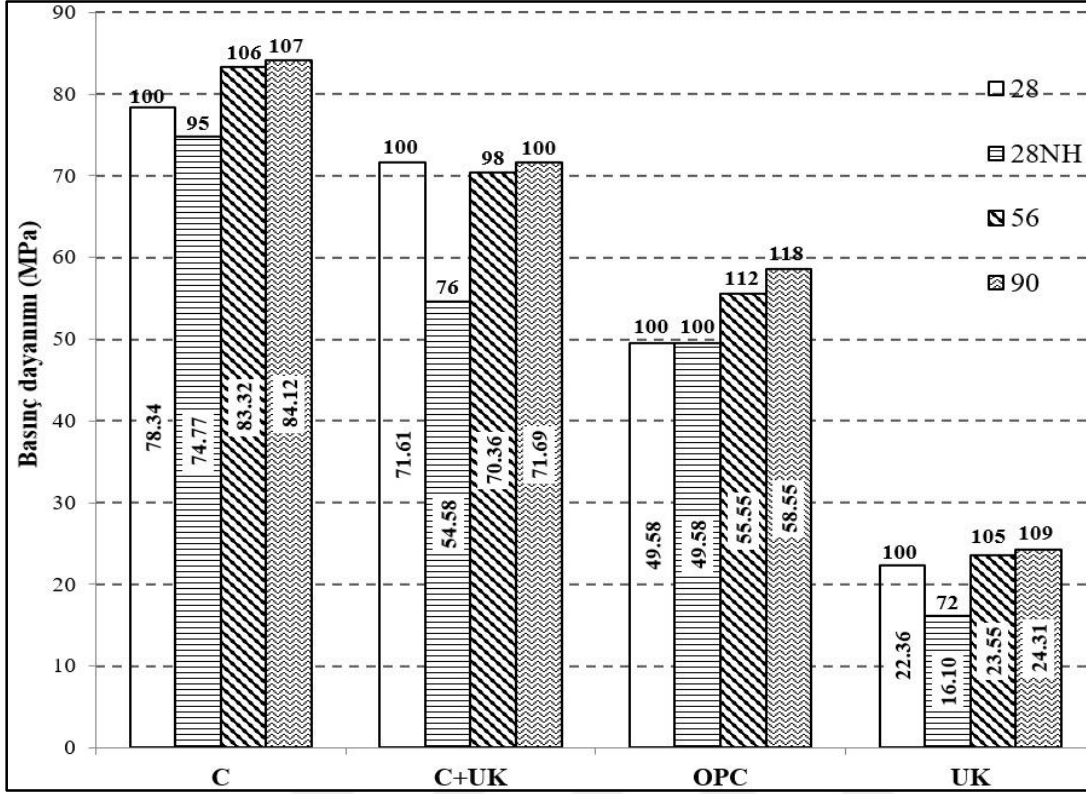


içeren numunelerin 56. ve 90. günlerdeki basınç dayanımları 28.güne göre sırasıyla %21 ve %27 azalmıştır.

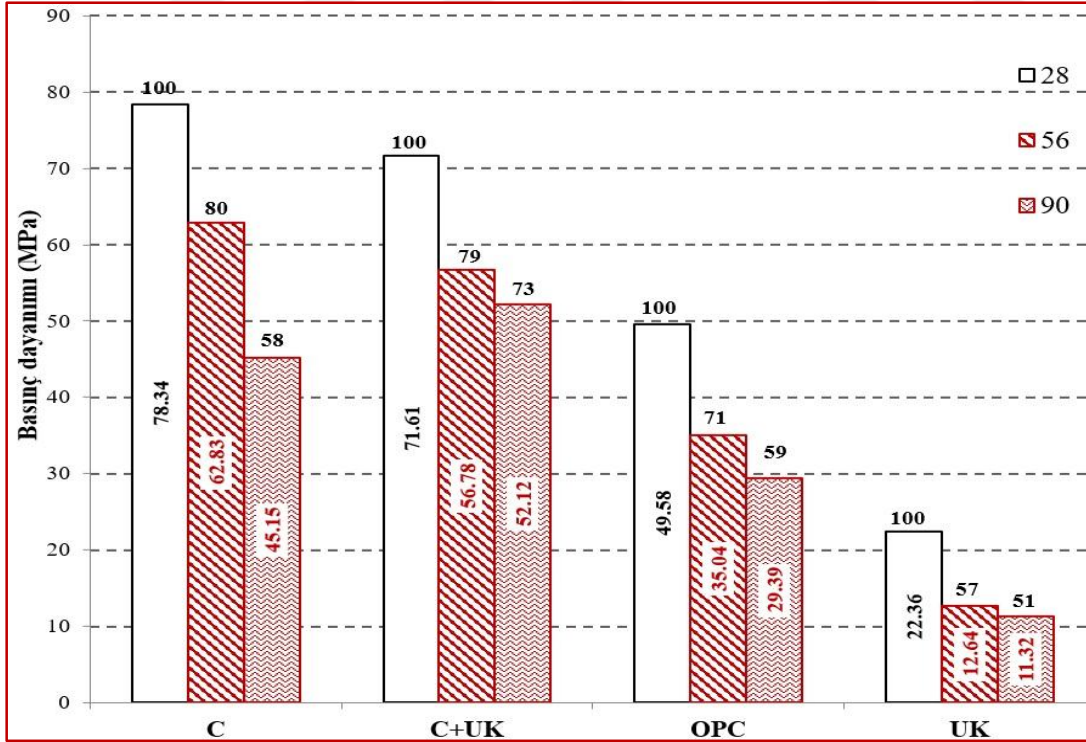
Şekil 4.3.b'de Portland çimentosuyla üretilen betonların %5 sülfürik asit ortamı etkisindeki basınç dayanımları 28., 56. ve 90. günlerde sırasıyla 49.58 MPa, 35.04 MPa, ve 29.39 MPa olarak bulunmuştur. Sülfürik asit dolayısıyla OPC beton 56. ve 90.günlerdeki basınç dayanımlarındaki azalma 28. güne göre sırasıyla %29 ve %41 olmuştur.

Şekil 4.3.b'de %100 uçucu kül içeren ısı kürü uygulanmış Geopolimer betonların %5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılması sonucu basınç dayanımları 28., 56., ve 90. günlerde sırasıyla 22.36 MPa, 12.64 MPa, ve 11.32 MPa olarak elde edilmiştir. Sülfürik asit etkisi nedeniyle 56. ve 90.günlerdeki beton basınç dayanımlarındaki azalma 28. güne göre sırasıyla %43 ve %49 olmuştur.

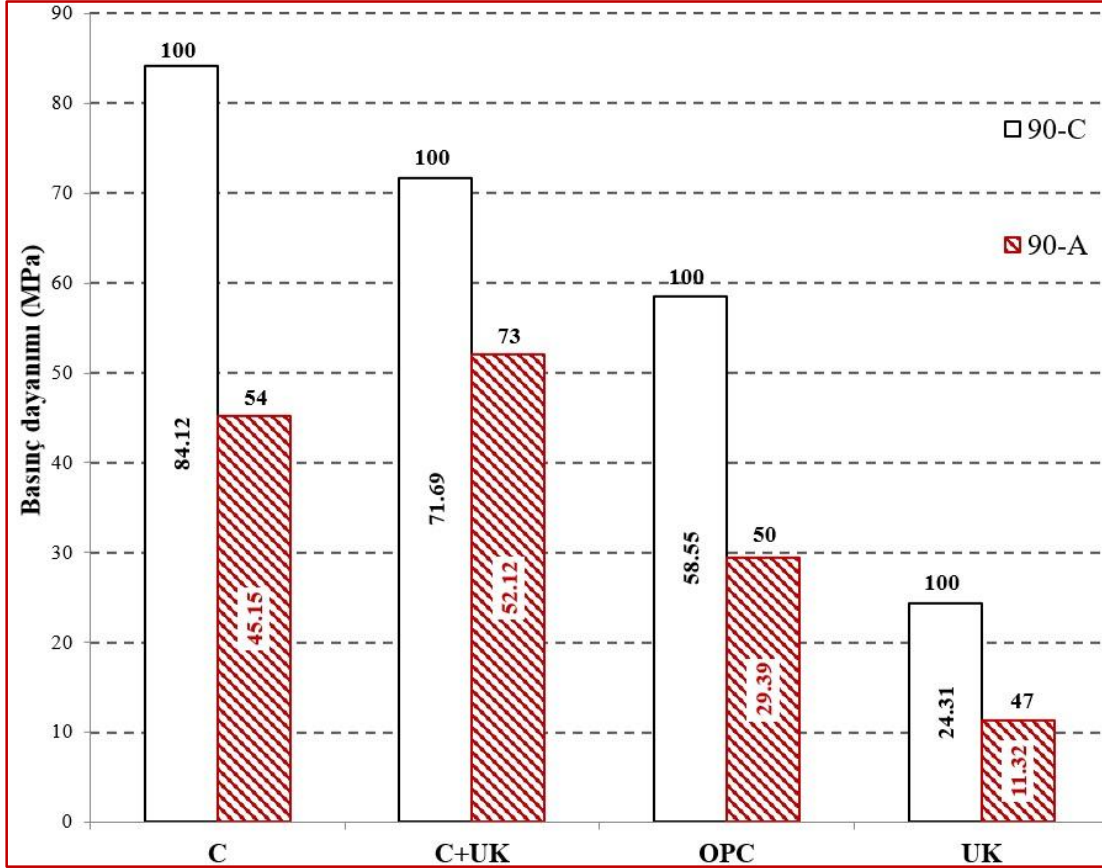
Şekil 4.3.c'de ise farklı betonların 90. gündeki kontrol ve sülfürik asit etkisindeki basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. %100 cürüflü Geopolimer betonların 90. gündeki kontrol ortamında 84.12 MPa iken asit ortamında 45.15 MPa olarak bulunmuştur. Asit etkisi dolayısıyla cürüflü Geopolimer betonun 90.gündeki basınç dayanımı % 46 azalmıştır. %50 cüruf ve %50 uçucu kül içeren Geopolimer beton numunelerin 90.gündeki kontrol ortamında basınç dayanımı 71.69 MPa iken, sülfürik asit ortamında 52.12 MPa olmuştur. 90. günde sülfürik asit etkisinden dolayı beton basınç dayanımındaki azalma %27 olmuştur. OPC betonun basınç dayanımı 90.günde 58.55 MPa iken sülfürik asit etkisinde 90.günde 29.39 MPa olmuştur. OPC beton basınç dayanımındaki asit etkisinden dolayı azalma %50 olmuştur. Uçucu küllü Geopolimer beton numunelerinin 90. gündeki kontrol ortamındaki basınç dayanımı 24.31 MPa iken, sülfürik asit etkisinde 11.32 MPa olmuştur. Asit etkisi dolayısıyla 90.günde betonların basınç dayanımındaki azalma %53 olmuştur.



a) Normal (hava) ortamındaki küp numunelerinin basınç dayanımı



b) 5% sülfürik asit ortamındaki küp numunelerinin basınç dayanımı



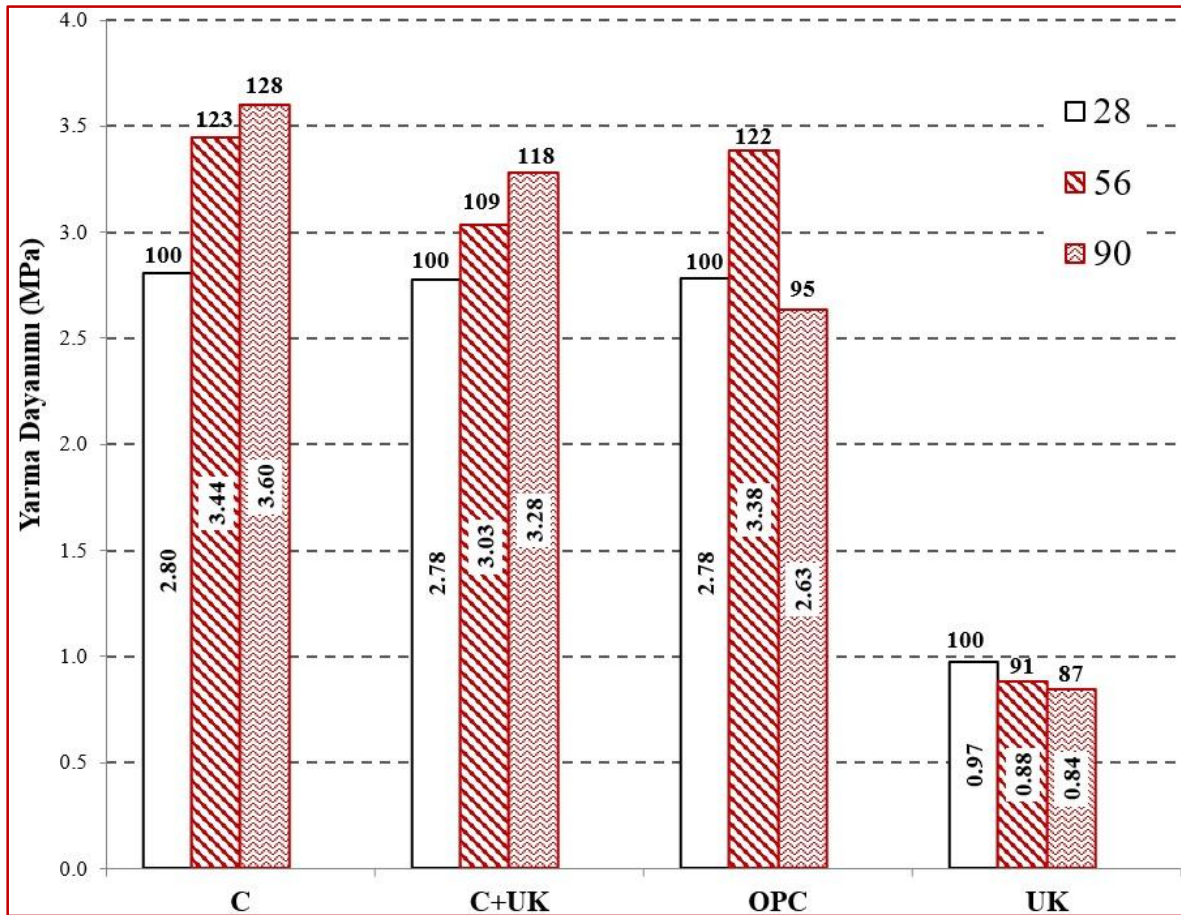
c) 90.günde küp numunelerin farklı ortamlardaki basınç dayanımı

Şekil 4. 3 Farklı ortamlardaki numunelerin basınç dayanımı

#### 4.3.2. Yarma testi

Silindir numunelerin çekmede yarma dayanımını incelemek için 28., 56., ve 90. günlerinde 5% sülfürik asit etkisinden dolayı yarma dayanımlarındaki meydana gelen değişim Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Silindir numunelerinin yarma dayanımı sonuçlarına göre 28.gündeki cürüflu Geopolimer silindir numunelerin yarma dayanımı 2.80 MPa iken, 56. ve 90. günlerdeki sülfürik asit etkisinde numunelerin yarma dayanımı sırasıyla 3.44 MPa ve 3.60 MPa bulunmuştur. Asit etkisinden dolayı cürüflu Geopolimer betonların 56. ve 90.günlerdeki yarma dayanımı sırasıyla %23 ve %28 artmıştır. %50 uçucu kül ve %50 cüruf içeren Geopolimer numunelerin yarma dayanımı 28. günde 2.78 MPa iken, %5 sülfürik asit etkisinde 56. ve 90. günlerdeki numunelerin yarma dayanımı sırasıyla 3.03 MPa ve 3.28 MPa olmuştur. Asit etkisinden dolayı %50 cürüflu ve %50 uçucu küllü Geopolimer betonların 56. ve 90.günlerdeki yarma dayanımı sırasıyla %9 ve %18 artmıştır. OPC betonların yarma dayanımı sonuçlarına göre 28 gündeki yarma dayanımı 2.78 MPa iken, 56.

ve 90.günlerde asit etkisi dolayısıyla numunelerin yarma dayanımı 3.38 MPa ve 2.63 MPa olarak elde edilmiştir. OPC numunelerinin asit etkisinden dolayı yarma dayanımı 56.günde 28.güne göre %22 artarken, 90. günde numunelerin yarma dayanımı %5 azalmıştır. %100 uçucu kül içeren Geopolimer betonların yarma dayanımı sonuçlarına göre 28.gündeki yarma dayanımı 0.97 MPa iken, 56. ve 90.günlerdeki uçucu küllü Geopolimer numunelerin yarma dayanımı sırasıyla 0.88 MPa ve 0.84 MPa bulunmuştur. %5 sülfürik asit etkisinden dolayı uçucu küllü Geopolimer numunelerin 56. ve 90. günlerdeki yarma dayanımı sırasıyla %9 ve %13 azalmıştır.



Şekil 4. 4 Numunelerin sülfürik asit etkisinde yarma dayanımı değişimi

## 5. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma kapsamında %100 uçucu küllü, %100 yüksek fırın cürufu, %50 uçucu küllü ve %50 yüksek fırın cürufu Geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisi altında performansı incelenmiştir. Geopolimer betonların performanslarını normal betonlarla karşılaştırmak amacıyla normal Portland çimentosuyla (OPC) betonları da üretilmiştir. %5 sülfürik asit ortamında numunelerin mekanik ve durabilite değerlendirmesi görsel denetim, ağırlık değişimi, basınç ve yarma dayanımlarındaki değişimlerle detaylıca incelenmiştir. 28.,56.ve 90. günlerdeki incelemeler sonucu elde edilen sonuçlara göre;

- Görsel inceleme sonuçlarına göre sülfürik asit etkisinden dolayı beton yüzeylerinde en fazla bozulma uçucu küllü Geopolimer betonlarda gerçekleşirken, en az bozulma ise %50 uçucu kül ve %50 cüruf içeren Geopolimer betonlarda gerçekleşmiştir.
- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre, kontrol (hava) ortamında bekletilen numunelerde en fazla ağırlık kaybı uçucu küllü Geopolimer betonlarda gerçekleşmiştir. Bu da uçucu küllü numunelerin hidrasyon reaksiyonlarının ısı küründen sonra da geliştiğini göstermektedir. Diğer Geopolimer betonlarda ağırlık değişimi çok fazla olmadığından hidrasyon reaksiyonlarının 28 güne kadar tamamlandığını göstermektedir.
- %5 sülfürik asit etkisinden dolayı meydana gelen ağırlık değişimi sonuçlarına göre, beton erezyonundan dolayı en fazla ağırlık kaybı ~% 1 ile uçucu küllü Geopolimer numunelerde meydana gelirken, sonra ~% 0.7 ile OPC betonu, daha sonra da ~%0.4 ile cürufu Geopolimer betonda gözlemlenmiştir. %50 cürufu ve %50 uçucu küllü betonda ağırlıkta azalma (parça dökülmesi) gözlemlenmemiş olup, asit emiliminden dolayı numune ağırlıklarında %0.4 artma gözlemlenmiştir.
- Küp ve silindir numunelerin 90. gündeki sülfürik etkisi dolayısıyla ağırlık değişimleri incelendiğinde ağırlık değişiminin küp numunelerde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sülfürik asit etkisi yüzey ile alakalı olduğundan küp numunelerinin yüzey alanı silindir numunelerin yüzey alanından daha fazla olmasından dolayı küp numunelerde bozulma daha çok gerçekleşmiştir.
- Basınç dayanım sonuçlarına göre, 90.gün kontrol (hava) ortamında en fazla basınç dayanımı %100 cürufu numunelerden (~84 MPa) elde edilmiştir. Hem cüruf hem de uçucu küllü Geopolimer betonun basınç dayanımı ~71 MPa, OPC betonun basınç dayanımı ~58 MPa, ve uçucu küllü Geopolimer betonun basınç dayanımı ~24 MPa

olarak bulunmuştur. Yüksek CaO içeren cürüflu Geopolimer betonun basınç dayanımı en fazla çıkarken, en az CaO içeren uçucu küllü Geopolimer betonun basınç dayanımı en düşük çıkmıştır.

- 90.gün asit ortamına maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına göre, en yüksek dayanım (~52 MPa) %50 cüruf ve %50 uçucu kül içeren Geopolimer betondan elde edilmiştir. Kontrol ortamında en fazla dayanım gösteren cürüflu Geopolimer betonun basınç dayanımı 52 MPa, OPC betonunun basınç dayanımı 29 MPa, ve uçucu küllü Geopolimer betonun basınç dayanımı 11 MPa olarak bulunmuştur. 90.günlük numunelerde sülfürik asitten dolayı oluşan beton basınç dayanımlarında azalma (kontrol numunesine göre) cürüflu Geopolimer betonda 46%, %50 cüruf ve %50 uçucu küllü betonda %27, OPC betonunda %50 ve uçucu küllü betonda %53'dür. Cürüflu Geopolimer ve OPC betonlarındaki bozulma nedeni olarak bu betonlardaki yüksek CaO miktarı gösterilebilir. Uçucu küllü betonlardaki bozulmanın nedeni ise hidrate olmamış uçucu kül parçacıkları ve düşük dayanımdan kaynaklanan beton geçirimsizliği olabilir. %50 uçucu küllü ve %50 cürüflu numunelerdeki daha az bozulmanın nedeni olarakta CaO bakımından zengin matrislerde uçucu külün ince olması nedeniyle boşlukları doldurarak geçirimsizliği azaltması ve bu betonlardaki düşük CaO miktarı olarak gösterilebilir. Sonuçlardan anlaşılacağı gibi, uçucu külün kimyasal etkilere karşı iyi bir performans göstermesi için betondaki CaO miktarının yüksek olması, ya da Geopolimer betonunda kullanılan uçucu kül miktarının daha fazla kullanılarak (daha yüksek uçucu kül dozajı) yüksek dayanım elde edilebilen bir beton üretilmesi gerekir. Bunun yanısıra, ısı kürü sonucunda hidrate olmamış uçucu kül parçacıklarının hidrate olması için daha fazla kür süresi ve sıcaklığı ya da CaO bakımından zengin mineral katkıları kullanılmalıdır.
- Silindir numunelerde gerçekleştirilen yarma dayanımı sonuçlarına göre, 90.günlük cürüflu ve %50 cüruf %50 uçucu küllü Geopolimer betonların yarma dayanım sonuçları 28.güne göre artma göstermiştir. Bunun bir nedeni olarak, betonlardaki bozulma dış yüzeylerde olduğu için ve en dış kısmın yarma deneylerinde çekmeye çalışmamasından dolayı bu numunelerde asit etkisinde yarma dayanımlarında artma gözlemlenmiş olabilir. OPC betonlarında ve uçucu küllü Geopolimer betonlarda geçirimsizliğin daha fazla olmasından dolayı bu betonlarda bozulma silindirlerdeki

çekme bölgelerine ilerlemiş olabilir bu da OPC ve uçucu küllü Geopolimer betonların yarma dayanımlarındaki azalmayı açıklayabilir.

- Yüksek kimyasal etkilere karşı en dayanıklı betonun %50 cüruf ve %50 uçucu kül içeren Geopolimer beton olduğu ortaya çıkmaktadır.
- Farklı çalışmalarda yüksek miktarda kullanılan uçucu küllü betonların kimyasal dirençlere karşı diğer betonlara göre daha iyi performans gösterirken, bu çalışma da daha düşük miktarlarda kullanılan uçucu külün kimyasal etkilere karşı performansı diğer betonlardan daha kötü bulunmuştur. Bu yüzden uçucu küllü üretilen betonlarda alkali/binder kavramının yanında minimum kullanılması gereken uçucu kül miktarı da belirtilmelidir.
- Bunun yanısıra cürufllu betonların ısı kürüne ihtiyacı olmadan üretebileceğinden, cürufllu Geopolimer betonların zararlı kimyasal ortamların dışındaki yerlerde kullanılmasının çevre dostu olmasından ötürü teşvik edilmesi sağlanmalıdır.



## KAYNAKLAR

1. Statista. (2014). “United states and world cement production in 2010 and 2013.,” Online. Available: <http://www.statista.com/statistics/219343/cementproduction-worldwide/> Swanepoel.(Erişim Tarihi:10.06.2018)
2. V.M. Malhotra, Making concrete “greener” with fly ash, *Concr. Int.* 21 (1999) 61–66.
3. Motorwala, A., Shah, V., Kammula, R., Nannapaneni, P. & Raijiwala, D. (2008). “ALKALI Activated FLY-ASH Based Geopolymer Concrete,”.
4. Sakulich, A. (2011). “Reinforced Geopolymer Composites for Enhanced Material Greenness and Durability,” *Sustainable Cities and Society.* 1(4)
5. G.L. Golewski, T. Sadowski, The fracture toughness the KIIC of concretes with F fly ash (FA) additive, *Constr. Build. Mater.* 143 (2017) 444–454, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.137>. (Erişim Tarihi:10.06.2018)
6. Alzeer, M. & MacKenzie, K.(2013). “Synthesis and Mechanical Properties of Novel Composites of Inorganic Polymers (Geopolymers) with Unidirectional Natural Flax Fibres (Phormium Tenax),” *Applied Clay Science*,76, 75–76.
7. Davidovits, J. (1994). “Properties of geopolymer cements on alkaline cements and concretes., ” *International conference*, 131–149.
8. Swamy, R. N. (1986). “Cement Replacement Materials, ” Glasgow: Surrey University Press, 3.
9. Davidovits, J.(2008). “Scientific tools, X-rays, FTIR, NMR. In J. Davidovits(ed) *Geopolymer. Chemistry and applications*, ” Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France., 61–76.
10. Diaz E.I, Allouche E.N and Eklund S.(2010). “Factors affecting the suitability of fly ash as source materials for geopolymers., ” *Fuel*, 89, 992–996.
11. Vijai, K., Kumutha, R. and Vishnuram, B. G. (2010). “Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete, ” *International Journal of the Physical Sciences*, 5, 1419–1423.
12. J. Davidovits, D.C. Comrie, J. Paterson, D.J. Ritcey, *Geopolymeric concretes for environmental protection*, *ACI Concr. Int.* (1990) 30–40.
13. Wallah, S.E. and Rangan, B.V. (2006). “LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE : LONG-TERM By Faculty of Engineering Curtin University of Technology, ” *Research Report GC 2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.*



14. Rajesh, A. M, Joe, M. A. and Mammen, R. (2014). “Study of the Strength Geopolymer Concrete with Alkaline Solution of Varying Molarity, ”engineeringcivil.com,4,19–24.
15. Deb, P. S., Nath, P. and Sarker, P. K. (2014). “The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature” Materials and Design, 62,32–39.
16. Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V.(2005). “Performance of Geopolymer Concrete Under Sulfate Exposure, ” Paper for Ed Nawy Symposium, American Concrete Institute.
17. Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). “Pozzolanic and Cementitious Materials, Gordon and breach publishers, advances in concrete” technology, ISSN1024-5038, 1.1.
18. (2012).“Slag Cement Association” Slag Cement. <http://www.slagcement.org/pdf/no1%20Slag%20Cement.pdf> South (Erişim Tarihi:10.06.2018)
19. Provis, J.L. and J.S.J. van Deventer.(2009). “Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications” Woodhead Cambridge, UK.
20. Aïtcin, P.(2008). “Binders for Durable and Sustainable Concrete” ISBN 0- 203-94048-2-Master e book,10.
21. Reeves, C.(1985). “The Use of Ground Granulated Blast-furnace Slag to Produce Durable Concrete.”How to Make Today's Concrete Durable for Tomorrow, Thomas Telford, London, May.
22. Douglas, E and Zebino, R. (1986). “Characterisation of Granulated and Pelletized Blast- furnace Slag”Cement and Concrete Research, retrieved from <http://www.sciencedirect.com>, 16, 662–670.
23. Frearson, JPH. and Uren, JM. (1986). “Investigations of Ground Granulated Blast-furnace Slag Containing Merwinitic Crystallisation”Second International Conference on Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain., 2.
24. Cook, DJ. Hinczak, I. and Cao, HT. (1987). “Heat of Hydration, Strength, and Morphological Development in Blast-furnace/Cement Blends” International Workshop on Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete, Toronto, Canada.
25. Krivenko, P. D. (1994). “Alkaline cements” Paper presented at the first international conference on alkaline cements and concrete, Kiev, Ukraine, 1114 October.

26. R.R. Lloyd, J.L. Provis, J.S.J. Deventer, Acid resistance of inorganic polymer binders. 1. Corrosion rate, *Mater. Struct.* 45 (2012) 1–14, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9744-7>. (Erişim Tarihi:10.06.2018)
27. A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan, G. Yılmaz, Ö. Arıöz, K. Ramyar, Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of selfconsolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1020–1025.
28. D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal, Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar, *Constr. Build. Mater.* 70 (2014) 453–459, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093>. (Erişim Tarihi:10.06.2018)
29. D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal, Structural performance of nano-silica modified flyash based geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 430–439, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.111>. (Erişim Tarihi:10.06.2018)
30. S. Riahi, A.Nazari, The effects of nanoparticles on early age compressive strength of ash-based geopolymers, *Ceram. Int.* 38 (2012) 4467–4476.
31. P.S. Deb, P.K. Sarker, S. Barbhuiya, Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 675–683, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.044>. (Erişim Tarihi:10.06.2018)
32. Temuujin, J. Van Riessen, A. Williams, R. (2009). “Influence of Calcium Compounds on the Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes” *Journal of Hazardous Materials* 167.
33. Palomo A, Grutzeck, M.W. & Blanco, M.T. (1999). “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future” *Cement And Concrete Research*, 29, 1323– 1329.
34. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. & Jalali, S. (2008). “Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products” *Construction and Building Materials*, 22.
35. Shi, C. and Qian, J. (1999). “High Performance Cementing Materials from Industrial Slags” *Resources, Conservation and Recycling*, 19, 195–207.
36. Taylor, H. F. W. (2003). “Cement Chemistry, Second Edition” Published by Thomas Telford publishing, Thomas Telford services ltd, 1 Heron Quay, London E144JD.
37. Jiang W, Silsbee MR, Breval E, Roy MD.(1997). “Alkali-activated cementitious materials in chemically aggressive environments” In: Young JF, editor. *Mechanisms of chemically degradation of cement-based systems*. E and FN SPON (1997) London, 2, 89–96.

38. Davidovits J, Comrie DC, Paterson JH, Ritcey DJ.(1990). “Geopolymeric concretes for environmental protection” *Concrete International: Design and Construction*, 12,30–40.
39. Palomo A, Blanco-Varela MT, Granizo ML, Puertas F, Vasquez T, Grutzeck MW.(1999). “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin” *Cement and Concrete Research*, 29, 997–1004.
40. Shi Caijun, S. J. (2000). “Acid corrosion resistance of different cementing materials” *Cement and Concrete Research*,30, 3–8.
41. Bakharev T, Sanjayan J.G, Chen B.(2003). “Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack” *Cement and Concrete Research*, 33(16),7–11.
42. Song X.J, Marosszeky M, Brungs M, Munn R.(2005). “Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. ” 10 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17-20 April.
43. Gourley, J.T. and Johnson, G.B. (2005). “Developments in Geopolymer Precast Concrete,” Paper presented at the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete, Perth, Australia.
44. Pacheco-Torgal F, Gomes J, J. S.(2010). “Durability and environmental performance of alkali-activated tungsten mine waste mud mortars., ” *J Mater Civil Eng*, 22, 897–904.
45. Mehta, P. (1993). “Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete – a critical review, Proc” 1st Int. Conf. Use fly ash, silica fume, slag other Miner. by- Prod. Concr. ACI SP-79, Am. Concr. Institute, Detroit, 1–48.
46. Hakkinen, T. (1987). “Durability of alkali-activated slag concrete” *Construction and Building Materials journal*, 6, 81–94.
47. Bassuoni, M. T. and Nehdi, M. L.(2009). “Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading” *Cement and Concrete Research*. 39, 206–226.
48. Liu PC. (1991). “Damage to concrete structures in a marine environment” *Materials and Structures*, 24, 302–307.
49. Olivia, M. and Nikraz, H. (2013). “Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete in Seawater” *Cement and Concrete Research*.
50. C. Barbosa, V. F. F.; MacKenzie, K. J. D.; and Thaumaturgo.(2000). “Synthesis and Characterization of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers” *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309–317.

51. Rangan, B. V.(2008). “FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE” Curtin University of Technology, Perth, Australia.
52. Xie, Z. and Xi, Y. (2001). “Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash” *Cement and Concrete Research*, 31, 1245–1249.
53. Divya, K., Chaudhary, R. (2007). “Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review” *Journal Materials Science*, 42, 729–746.
54. Wang. K, Shah. S, Mishulovich. A. (2004). “Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKDfly ash binders” *Cement and Concrete Composites*, 34, 299–309.
55. Poon, C., Azhar. S, Anson,M., Wong.Y. (2003). “Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures” *Cement and Concrete Composites*, retrieved from [http// www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 25, 83–89.
56. Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A., Chindaprasirt, P. (2006). “Synthesis of High Calcium Fly Ash and Calcined Kaoline Geopolymer Mortar. ” *Int. Conf. Pozzolan, Concr. Geopolymer, Khhon Kaen, Thailand, May24-25*.
57. Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G. and Sagoe-Crentsil, K.(2008). “Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures.” *Cement Concrete Composites*, 30, 986–991.
58. Barros, J. A. O and Cruz, J. S. (2001). “Fracture Energy of Steel FiberReinforced Concrete” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 8, 29–45.
59. F. (Draft R. R. T. 50.( 1985). “Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, ” *Mechanics of Composite Materials and Structures*,18,285–290.
60. Hillerborg,A.(1985). “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy GF of Concrete, ” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 18, 291–296.
61. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. & Rangan, B. V. (2004). “on the development of fly ash-based geopolymer concrete., ” *ACI Materials Journal*, 101,6.
62. Kozul R, D. D. (1997). “Effects of aggregate type, size and content on concrete strength and fracture energy” *Technical report SM 43*. Lawrence, KS: The University of Kansas Research Inc.
63. Bharatkumar, B.H, Raghuprasad, B.K, Ramachandramurthy, D.S, Narayanan, R, Gopalakrishnan, S.(2005). “Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete., ” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 38, 63–72.

64. Carpinteri A, B. R.(2010). “Fracture behavior of plain and fibre-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading., ”Mater Des, 32–42.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Melis BİLENLER ALTUNDAL  
Uyruğu : T.C  
Doğum Tarihi ve Yeri : 1990 Malatya  
Medeni Hali : Evli  
Telefon : 0 545 688 67 69  
Faks : -  
E-Mail : melisbilenler@ hotmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İ.G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnş. Müh.A.B.D.	
Lisans	Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Müh.	2013
Lise	Sümer Lisesi	2007

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görevi
2014-	T.C. BAKIRKÖY BELEDİYESİ	Kontrol Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

-

### Hobiler

Gezmek, Tatil Yapmak, Ata binmek, Spor yapmak.



*ĞELİŐİM ĞELİŐMEKTİR..*

