

**T. C.  
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**UÇUCU KÜLLÜ GEOPOLİMER BETONLARDA GECİKMİŞ  
ISI KÜRÜNÜN DAYANIM VE DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Ruya KHALEEL RASHID**

**Danışman**

**Dr.Öğr. Üyesi Anıl NIŞ**

**İstanbul – 2021**



## TEZ TANITIM FORMU

**Yazar Adı Soyadı** : Ruya KHALEEL RASHID

**Tezin Dili** : Türkçe

**Tezin Adı** : Uçucu Küllü Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürünün  
Dayanım Ve Durabilite Özelliklerine Etkisi

**Enstitü** : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

**Anabilim Dalı** : İnşaat Mühendisliği

**Tezin Türü** : Yüksek Lisans

**Tezin Tarihi** : 06.07.2021

**Sayfa Sayısı** : 76

**Tez** : Dr.Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

**Danışmanları**

**Dizin Terimleri** : Geopolimer beton, Uçucu kül, Alkali solüsyon, Sülfürik asit

**Türkçe Özet** : Çimentosuz beton yani geopolimer beton standartlaşma aşamasına geldiği takdirde yapılarda kullanımı yaygınlaşacak ve ülkemiz açısından hem enerji maliyetlerini düşürmek için hem de çevreye daha duyarlı daha az karbondioksit yaymasından ötürü çevreci beton olarak nitelendirilebilecektir.

**Dağıtım Listesi** : 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne  
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

*İmzası*

*Ruya KHALEEL RASHID*

**T. C.  
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**UÇUCU KÜLLÜ GEOPOLİMER BETONLARDA GECİKMİŞ  
ISI KÜRÜNÜN DAYANIM VE DURABİLİTE  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Ruya KHALEEL RASHID**

**Danışman**

**Dr.Öğr. Üyesi Anıl NIŞ**

**İstanbul – 2021**

## **BEYAN**

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Ruya KHALEEL RASHID

.../.../2021



**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE**

Ruya KHALEEL RASHID'ın "Uçucu Küllü Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürünün Dayanım Ve Durabilite Özelliklerine Etkisi" adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

*İmza*

Başkan

*Doç. Dr. Savaş ERDEM*

*İmza*

Üye

*Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ*  
(Danışman)

*İmza*

Üye

*Dr. Öğr. Üyesi Mukhallad*  
*Mohammed Mawlood AL-*  
*MASHHADANI*

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

... / ... / 2021

*İmzası*

*Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ*

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Enerji tasarrufu ve yaşadığımız çevreyi korumaya artan vurgu, geleneksel yapı malzemelerine alternatiflerin araştırılmasına yol açmıştır. Bu tür araştırmaların arkasındaki önemli hedeflerden bazıları, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve gerekli enerji üretimini en aza indirmektir. Betonun dünya çapında kullanımı sudan sonra ikinci sıradadır. Normal Portland Çimento (OPC), geleneksel olarak beton üretiminde birincil bağlayıcı olarak kullanılır. Çimento üretimi, hacmi ve sera gazı emisyonuna katkısı açısından önemli bir endüstriyel faaliyettir. Genel olarak, çimento üretimi toplam CO<sub>2</sub> salınımının en az % 5 ila 7'sine sebep olmaktadır. Çevrenin bir diğer önemli sorunu, termik santral tarafından elektrik üretim süreçlerinde kömürün yakılmasıyla ortaya çıkan tehlikeli bir atık madde olan uçucu külün bertaraf edilmesidir. Bu çalışma, beton yapımında çimento kullanımından kaçınarak maksimum uçucu kül miktarını kullanmayı ve böylece atmosferdeki CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmayı amaçlamaktadır. Bu sebeple, % 100 düşük kalsiyum içerikli F tipi uçucu kül ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kombinasyonu kullanılarak hazırlanan geopolimer betonların dayanım ve durabilitesi kür koşullarını da dikkate alarak yapılan deneysel bir çalışmayı içermektedir. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> ve 600 kg/m<sup>3</sup> olacak şekilde üç farklı miktarda seçilmiştir. Kimyasal dayanıklılık çalışmaları dikkate alınarak ise alkali solüsyon/bağlayıcı miktarı 0.45 ve 0.55 olarak seçilmiştir. Bu kapsamda altı farklı geopolimer beton üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak 2.5 / 1 oranında sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum hidroksit molaritesi 14 M olarak seçilmiştir. 6 farklı geopolimer betonun kimyasal dayanıklılığındaki değişim, hem laboratuvar hem de % 5 sülfürik asit solüsyonlarından 28., 90. günlere kadar bekletilerek incelenmiştir. Yapılan çalışmada, % 5 sülfürik asit nedeniyle numune yüzeylerindeki değişim, numune ağırlıklarındaki değişim ve basınç dayanımındaki değişim ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ürettiğimiz geopolimer betonlar yüksek mekanik mukavemet ve sülfürik asit dayanıklılığı gösterdiği için mevcut yapılarda kullanmak mümkündür. Yapılarda geopolimer beton kullanımının standart hale getirilmesi ve gerekli düzenlemelerin benimsenmesi için geopolimer beton üzerinde daha fazla araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer beton, uçucu kül, Alkali solüsyon, Sülfürik asit

## SUMMARY

Expanding accentuation on energy conservation and ecological insurance has prompted the investigation of the alternatives to ordinary Portland cement based building materials. Some of the significant objectives behind such examinations are to decrease the gas emissions and limit the energy requirement for the constructional material production. The utilization of ordinary Portland cement all throughout the planet is second just after water. Ordinary Portland Cement (OPC) is traditionally utilized as the essential binder material for OPC concrete production. All around the world, the production of OPC results in 5% to 7% CO<sub>2</sub> emission. Another serious issue for the climate change is to disposal issue of the fly ash, a dangerous waste material when left to the environment, which is created by thermal power plant by burning of coal. In this study, one of the aims is to produce geopolymer concrete by utilizing higher contents of fly ash and to decrease CO<sub>2</sub> emission in air by staying away from utilization of OPC for concrete production. This thesis reports an experimental study conducted to investigate the impact of curing conditions on the compressive strength of various geopolymer concretes prepared by using 100% low calcium content F-type fly ash as the base material and the combination of sodium hydroxide and sodium silicate as alkali activators. Three binders, 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> and 600 kg/m<sup>3</sup>, have been selected. Considering the durability studies for the geopolymer concretes, the alkali activator / binder amount was chosen as 0.45 and 0.55. In this context, six different geopolymer concrete were produced. As alkaline activators sodium silicate and sodium hydroxide were used in the ratio of 2.5 / 1. Molarity of sodium hydroxide was selected as 14M. The chemical resistances of these six types of alkaline activated concretes were examined both in the laboratory environment and in the solutions of 5% sulfuric acid attack for 28 days. In our study, changes in specimen surfaces due to 5% sulfuric acid, change in specimen weights and change in compressive strengths were investigated in detail. According to the results, it is feasible to utilize this new generation geopolymer concretes in existing buildings as it shows high mechanical strength and sulfuric acid resistance. To standardize the utilization of geopolymer concrete in structures and to adopt the important regulations and standards, new research is needed about mechanical and durability investigation of geopolymer concretes for structural utilization.

**Keywords** : Geopolymer concrete, Fly Ash , Alkali solution, Sulfuric acid



# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
SUMMARY .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMALAR.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
GİRİŞ.....	1

## BİRİNCİ BÖLÜM

1.1. Tezin Önemi .....	4
1.2. Yapılan Çalışmanın Kapsamı .....	5

## İKİNCİ BÖLÜM

### GEOPOLİMER BETON İÇERİKLERİ

2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu-GGBFS .....	6
2.1.1. Betonlarda yüksek fırın cüruf kullanılması .....	7
2.2. Uçucu Kül.....	7
2.2.1. Betonlarda uçucu küllerin kullanılması .....	8
2.3. Alkali Aktivatörler .....	9
2.4.1. Asit etkisi .....	11
2.4.2. Sülfat etkisi.....	12
2.4.3. Deniz suyu etkisi.....	13
2.5. Geopolimer Betonun Özellikleri.....	13
2.6. Betonların Mekaniksel Dayanıklılığını Etkileyen Faktörler .....	14
2.6.1. Betonun büzülmesi.....	14
2.6.2. Alkali - Agregat reaksiyonu.....	15
2.6.3. Yüksek sıcaklıklara ve yangına dayanıklılık .....	16
2.6.4. Döngüsel ıslatma ve kurutma .....	16
2.7. Geopolimer Betonların Dayanımlarına Etki Eden Unsurlar .....	17
2.7.1. Silisyum dioksit / sodyum oksit oranı .....	17
2.7.2. Geopolimer betonların su muhtevası.....	17
2.7.3. Isı kürü uygulanması.....	18
2.7.4. Sodyum silikat/sodyum hidroksit (ss/sh) oranı .....	19

2.7.5. Sodyum Hidroksitin Molaritesi .....	20
--	----

## **ÜÇÜNCÜ BÖLÜM**

### **DENEY YÖNTEMİ**

3.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler .....	22
3.1.1 Uçucu Küller .....	22
3.1.2. Agrega Özellikleri.....	23
3.1.3. Alkali Solüsyon Kullanımı .....	24
3.1. 4. Kimyasal Akışkanlaştırıcı .....	25
3.2. Deney Yöntem .....	26
3.2.1 Küp Kalıp .....	26
3.2.2. Alkali Solüsyon Hazırlığı .....	27
3.2.3. Karışımların Belirlenmesi .....	27
3.2.4. Geopolimer Betonların Üretilmesi Ve Dökümü .....	31
3.2.5. Kür Yöntemi .....	32
3.2.6. Sülfürik Asit Solüsyon Hazırlıkları.....	33
3.2.7. Geopolimer Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim.....	34
3.2.8 Geopolimer Numunelerde Basınç Dayanımının Belirlenmesi .....	34

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **BULGULAR VE TARTIŞMA**

4.1. Numunelerin Görsel İncelemesi .....	36
4.2. Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim.....	39
4.3. Numunelerin Basınç Dayanımları .....	43
<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>58</b>

## KISALTMALAR

<b>M</b>	:	Molar
<b>NaOH</b>	:	Sodyum Hidroksit
<b>KOH</b>	:	Potasyum Hidroksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	:	Sodyum Silikat
<b>C</b>	:	Karbon
<b>CaO</b>	:	Kalsiyum oksit(Sönmemiş Kireç)
<b>SO<sub>3</sub></b>	:	Kükürt trioksit
<b>K<sub>2</sub>O</b>	:	Potasyumoksit
<b>N</b>	:	Azot
<b>S</b>	:	Kükürt
<b>H</b>	:	Hidrojen
<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>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	:	Sülfürik asit
<b>OPC</b>	:	Normal Portland Çimento
<b>AAEB</b>	:	Alkali Aktive Edilmiş Beton

## TABLolar LİSTESİ

<b>Tablo 3. 1</b> F- tipi uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliği .....	22
<b>Tablo 3.2.</b> Çalışmada kullanılan agreganın özelliği .....	24
<b>Tablo 3.3.</b> Kullanılan Sodyum silikat aktivatörünün özelliği.....	24
<b>Tablo 3.4.</b> Çalışmada kullanılan kimyasal akışkanlaştırıcı özelliği .....	26
<b>Tablo 3.5.</b> FA100-400-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı.....	28
<b>Tablo 3.6.</b> FA100-400-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı....	28
<b>Tablo 3.7.</b> FA100-500-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı.....	29
<b>Tablo 3.8.</b> FA100-500-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı.....	29
<b>Tablo 3.9.</b> FA100-600-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı.....	30
<b>Tablo 3.10.</b> FA100-600-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı...	30

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1 Öğütülmüş fırın cürufu .....	7
Şekil 2.2 uçucu kül malzemesi.....	8
Şekil 2.3 Sülfürik asidin basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Ariffin vd., 2013) .....	12
Şekil 2.4 Sıcaklığın geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi(Yahya vd.,2015) ....	19
Şekil 2.5 NaOH molaritesinin GPC'nin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi .....	21
Şekil 3. 1 Çalışmada kullanılan F-tipi uçucu küller .....	22
Şekil 3. 2 Çalışmada kullanılmış iri ve ince agregalar (a) iri agrega (b) ince agrega .....	23
Şekil 3.3. Sodyum hidroksit (NaOH).....	25
Şekil 3.4. Çalışmada kullandığımız kimyasal akışkanlaştırıcı.....	25
Şekil 3. 5 Çalışmada kullandığımız kalıplar .....	26
Şekil 3. 6 Alkali solüsyonların hazırlığı.....	27
Şekil 3. 7 Geopolimer betonların döküm süreci.....	32
Şekil 3.8. Numunelerin sülfürik asit solüsyonunda bekletilmesi.....	33
Şekil 3.9. Sülfürik aside maruz kalan beton numunelerinin ağırlıklarının belirlenmesi.....	34
Şekil 3.10. Basınç dayanımı testleri.....	35
Şekil 4.1 %5 Sülfürik asite maruz bırakılan betonların görsel incelenmesi .....	39
Şekil 4.2. FA100-600 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları.....	40
Şekil 4.3 FA100-500 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları.....	41
Şekil 4.4 FA100-400 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları.....	42
Şekil 4. 5 90 gün labarotuvarda ortamında bekletilen numunelerinin basınç dayanımı sonuçları .....	44
Şekil 4.6 90C-28A numunelerinin basınç dayanımı sonuçları .....	45
Şekil 4.7 88C2O numunelerinin basınç dayanımı sonuçları .....	46
Şekil 4.8 88C2O-28A numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	47
Şekil 4.9. FA100-600 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	49
Şekil 4.10 FA100-500 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	50
Şekil 4.12 Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan beton numunelerinin basınç dayanımları .....	53
Şekil 4.13 Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.55 olan beton numunelerinin basınç dayanımları .....	54
Şekil 4.14 Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 ve 0.55 olan numunelerinin basınç dayanımları.....	55

## ÖNSÖZ

Bu çalışma kapsamında değerli yardımlarını ve ilgisini esirgemeksizin bu çalışmanın devam edebilmesini sağlayan, hem yönlendirip hem de gerekli akademik bilgi desteğinden ötürü danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi **Anıl NİŞ**'e çok teşekkür ederim.

Çalışma aşamasında hem maddi hem de manevi olarak desteklerinden dolayı ve beni sürekli olarak akademik kariyerimin gelişimi için destekleyen aileme çok teşekkür ederim.

Çalışmamızın her aşamasında yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.



## GİRİŞ

Genel olarak, inşaat malzemesi olarak kullanılan beton dünya çapında hayati bir rol oynamaktadır. Daha sonra modern ülkelerde beton malzemesine ihtiyaç artarak tahmin edilmektedir. Piyasada mevcut olan, PC,"Portland çimentosu" anlamına gelen , normal beton üretiminde, geleneksel çimento içeren beton için bağlayıcı olarak kullanımı yıllık % 3'e kadar yükseldiğinden bu malzemenin yapılarda kullanımı hala ilk tercihtir(Malhotra, 2002). Sera gazı emisyonu katkısı olarak betonun oynadığı olumsuz yönde dikkat çekmektedir. Bunun nedeni ise, geleneksel Portland çimentosunun ikinci büyük sera gazı açığa çıkarması olarak gösterilebilir. Bu çimento malzemesinin üretimi 2006 yılında 2540 milyon tondan 2050 yılında 4380 milyon tona ulaşması beklenmektedir ve bu sebeple sera gazı emisyonlara ve küresel ısınma endeksleri üzerinde çok büyük etkiye sahip olmaktadır.(Pachauri vd., 2014).Beton üretiminde sürdürülebilirliği sağlamak için çevre dostu olarak farklı çimentoya benzer bağlayıcı malzemeler ile değiştirmeli ve yeni nesil sürdürülebilir beton tasarımları ve üretimleri için alternatif bağlayıcıların bulunmasına ihtiyacımız vardır. İnşaatta kullanılan geleneksel betonlarda en önemli bir bileşen olan geleneksel Portland çimentosu, üretim sırasında atmosfere önemli miktarda CO<sub>2</sub> salmaktadır. 1 ton OPC üretiminin hava sahasına yaklaşık 1 ton kadar CO<sub>2</sub> salınmasına neden olduğu tahmin edilmektedir. Bu aşırı miktarda karbondioksit salınımı hem küresel ısınmayı hem de sera gazlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Yılda kişi başına yaklaşık bir metreküp beton kullanılmaktadır. Bu miktar düşünüldüğünde, dünya çapında çok büyük miktarlarda beton kullanıldığını göstermektedir. Bu nedenle, çimento üretiminin dünya çapındaki CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık % 7'sine katkıda bulunduğu rapor edilmektedir(Douglas vd., 1991).

Geopolimer beton, aksine, düşük sıcaklıkta üretilmesine ek olarak düşük miktarda kalsiyum bazlı hammaddelerin beton içerisinde kullanılmasına olanak sağlar. Bu yeni nesil betonlarda kullanılan yakıt sayısı da geleneksel Portland çimentolu betona göre daha azdır ve bu da yeni nesil betonların üretim sırasında karbondioksit emisyonunun azalmasına neden olabilecektir. Geçtiğimiz yüzyılda 70'lerin başlarında geopolimer terimini inorganik doğası "Geo" ve fizikte bugün kullanıldıkları şekliyle organik "polimerler" ile ilgili yapısal benzerliği temsil etmek için ortaya çıkarmıştır (Davidovits, 1994) . Bugün fizikte kullanıldıkları için bu malzemeler organik "polimerler" ile ilgili olmaktadır. Bunların hepsi, aktif malzemelerin malzeme sınıflandırmasının yanı sıra geopolimerizasyon olarak bilinen betonun dayanım kazanmasını sağlayan mekanizmaların bir parçasıdır. Geopolimer malzemeler, alümina ve

silika birimleri temelinde inorganik polimerler olarak tanımlanabilir. Oldukça alkali bir ortamda sodyum silikat ile yoğunlaştırılan doğal porselenin bir parçası olduğu çeşitli dehidroksilazealümina-silikat tozlarından oluşturulurlar. Sodyum silikat ve alkali hidroksit üretiminin rafine ürünlerden elde edilmesi gerekmesine rağmen, geopolimer beton üretimi, sıradan Portland çimentolu beton üretimine göre daha düşük çevresel etkiye sahip olmaya devam etmiştir. Ayrıca alümina-silikat esaslı malzemeler doğada bol miktarda çeşitli atık ve yan ürünlerde bulunurken, ve de yeni nesil üretim işlerinde kullanılarak geopolimer betonlar üretmek mümkündür, bu nedenle yeni bir bağlayıcı bulmaya gerek yoktur (Krivenko, 2003). Bu yeni nesil alkali aktif malzemelerin dayanım ve durabilite özellikleri, Portland çimentolu betonlar ile karşılaştırıldığında eğer uygun oranlarda alkali aktivatörler kullanılırsa Portland çimentolu betonlar ile neredeyse bire bir dayanım ve durabilite özellikleri gösterebilir. Geopolimer beton, ince ve iri agregayı birleştirmek için çimento matrisine benzer ve geopolimerik reaksiyonlar sonucu dayanım kazanan bir beton olarak tanımlanabilir. Geopolimer betonlar üzerinde yapılan deneylerde, hem yüksek mukavemet hem de yüksek asit direncinin yanı sıra yüksek donma-çözünme ve termal direnç gibi özelliklerde üstün dayanım ve durabilite performansları elde edilmiştir (Hardjito vd., 2004).

Normal Portland çimentosuna göre geopolimer beton kullanımı ile daha hızlı ve sert priz alan ve geleneksel beton gibi dökülüp kalıplanabilen bir karışım elde etmek mümkündür. Bu teknolojinin temelini büyük Piramitlerde kullanılan çok eski bir inşaat malzemesi ilkesine dayandığı iddiaları mevcuttur. Fakat son 21 yıl içinde bu malzeme yeniden tekrar keşfedildi ve araştırma sektörünün tüm dikkatleri geopolimer betonların dayanım ve durabilite özelliklerine odaklanmıştır(Provis vd., 2015)



## BİRİNCİ BÖLÜM

Beton endüstrisinde en çok kullanılan mineral katkı puzolandır. Bir "puzolan", "silisli veya silisli ve alüminli bir malzeme, ince bölünmüş bir biçimde - ve nemin varlığında - çimento benzeri özelliklere sahip bileşikler oluşturmak için normal sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girmesi olarak tanımlanır (Malhotra ve Mehta, 1996). Puzolanik malzemelere örnek olarak volkanik kül, süngertaşı, opalin şeylleri, yanmış kil ve uçucu kül verilebilir. İki farklı tip puzolan vardır; doğal puzolan ve yapay puzolan. Doğal puzolan, tras, bazı pümisitler, perlit gibi volkanik kökenlidir. Diğer puzolanlar ise uçucu kül, fırın cürufu ve silis dumanı gibi sanayi yan ürünlerden gelen atık malzemelerdir (Güneyisi, 2004). Özellikle bu sanayi yan ürünlerin bertaraf edilmesi ayrıca önem arz etmektedir. Çünkü fabrikada üretim sonucu açığa çıkan atık malzemeler bir süre sonra yeniden kullanılmazlarsa boş arazilere dökülmektedir. Bu boş arazilere dökülen bu atık malzemeler rüzgar ile şehir merkezlerine taşınarak havayı kirletmektedir. Ayrıca bu atık malzemelerin döküldüğü veya rüzgarla taşındığı arazilerde sebze ve meyve üretiminin hem daha kalitesiz olacağı hem de sağlığa zarar verecek boyutlara sebep olacağı unutulmaması gereken bir gerçek olarak önümüze çıkmaktadır. Dolayısıyla bu atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi çevre, ekonomik, sağlık ve enerji alanları açısından oldukça önem arz etmektedir.

Geleneksel betonlarda kalsiyum ve silikondan oluşan betonlardan ziyade alüminyum ve silikondan oluşan beton türü, "GEOPOLİMER BETON" kelimesi ile ifade edilmektedir. Bu tür inorganik polimerlere ise geopolimer denir ve oda sıcaklığında oluşturulabilir. Bu süreçteki malzemelerin kaynağı da endüstriyel atık veya yan ürün malzemeleridir.

Son zamanlarda insanlar tehlikeli katı atık üretiminin ve bunların sağlığı nasıl etkilediğinin daha fazla farkına varmıştır. Ayrıca, bunların bertarafının çevre üzerindeki etkisi de büyük ölçüde tartışılmaktadır. Bu nedenle, endüstri bilim adamları, atık ürünlerin yeniden kullanılabilmesi için çeşitli yollar araştırdı. Geopolimer betonları oluşturmak için Portland çimentosu yerine atıksal maddelerin kullanım imkanı mevcuttur (Davidovits, 2005). Bu sebeple geopolimer betonlar fabrika atık malzemelerini bağlayıcı olarak kullanabilmekte, bu da çimentosuz beton diye tarif edilen hava dost, çevreci, ve üretimi sırasında daha az enerji gerekmesi nedeniyle geleneksel betonlara nazaran önemli alternatif bir beton türü haline gelmektedir. Şu an geopolimer betonların normal yapılarda kullanılabilmesi amacıyla araştırmalar devam etmektedir.

## 1.1. Tezin Önemi

Günümüzde geleneksel Portland çimento kullanılarak üretilen beton, yapıların yapımında en çok kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Betona alternatif başka bir yapı malzemesi olan yapısal çeliklerin fiyatı hem ekonomik hem de politik koşullara son derece duyarlı olduğundan, son senelerde ülkemizdeki çelik fiyatlarının neredeyse 2 kat artmasından dolayı, yapılarda beton malzeme kullanımı önümüzdeki senelerde de daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Mevcut mesken stoku eski olduğundan ve yapılar depreme dayanıklı olmadığından, yüksek basınç dayanımlı ve kimyasal / fiziksel tesirlere karşı iyi durabiliteli beton üretimi ve kullanımı çok önemlidir. Beton içeriği genellikle çimento, su ve agregalardan oluşmaktadır. Geleneksel Portland çimentosu beton içinde bağlayıcı özelliğine sahip olan bir malzemedir. Portland çimentosu üretiminde yüksek enerji ihtiyacı ve çevreye karbondioksit salınımı nedeniyle ülkemizde ve tüm dünyada çimentodan ziyade kullanılabilir yeni nesil-sürdürülebilir yapı malzemelerine gerek duymaktadır. Geçtiğimiz günlerde, çimento olmayan beton olarak isimlendirilen geopolimer beton yada alkali aktif betonla ilgili araştırmalar yoğunlaştırılmıştır. Çimento içermeyen bu betonlarda kullanılabilir bağlayıcılardan biri ise düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu küldür. Uçucu külün sertleşip dayanım kazanması için çoğunlukla su yerine alkali aktivatörler kullanılır, bu aktivatörlerin en önemli ve diğer kimyasallara nazaran daha ekonomik olmasından ötürü en yaygın kullanılanlardan biri ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit bileşimidir.

Tez kapsamında % 100 uçucu kül kullanılarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş alkali beton üretilenektir. Uçucu kül mineral bileşimindeki düşük CaO içeriği nedeniyle, uçucu kül geopolimerizasyon süreci yavaş olmaktadır. Geopolimerizasyon reaksiyonlarını daha hızlı bir şekilde tamamlamak için ısı kürüne ihtiyaç vardır. Yapacağımız çalışmada % 100 uçucu kül içeren geopolimer betonlarda basınç dayanımının gelişimi, farklı alkali aktivatörler / bağlayıcı ve dozaj gibi parametreler değiştirilerek farklı süreçlerde araştırılacaktır. Bunun yanı sıra değişik uçucu küllü geopolimer betonların kimyasal dayanıklılığı, en tehlikeli kimyasalların başında gelen % 5 sülfürik asitte irdelenecektir. Bu durabilite deneylerinin kapsamında ise geopolimer numunelerinde en dış yüzeylerdeki sülfürik asit etkisine bağlı yüzey değişimi, numune ağırlıklarındaki azalma /artma ve basınç dayanımındaki azalma gibi durumlar etraflıca irdelenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların, binalarda geopolimer betonların kullanımına olanak sağlamak için gerekli standartların oluşturulmasında çok faydalı bir çalışma olacağı düşünülmektedir. Özellikle prekast endüstrisinde bu tip geopolimer betonların öncelikli

kullanımı hem inşaat zamanında kısalmayı sağlayacaktır hem de çevremizde karbondioksit salınımının azalmasına olumlu yönde etki edecektir.

## **1.2. Yapılan Çalışmanın Kapsamı**

Kısım 1 – Özet Kısım : Bu kısımda tezin özeti ve hedefleri anlatıldı.

Kısım 2 - Literatür Taraması: Bu kısımda ise geopolimer beton içeriğinde bulunan bağlayıcı maddeler, alkali aktivatörler ve bu aktivatörlerin içerikleri ve kullanımı ile ilgili araştırma çalışmalarına yer verilmiştir.

Kısım 3 - Yapılan Testler: Bu kapsamda deneyde kullanılan malzemeler, karışım oranları, deney yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Kısım 4 - Sonuç: Sonuç kısmında yapılan testlerden elde edilen sonuçların tartışması ve değerlendirilmesi konusunda bilgi verilmektedir.

## İKİNCİ BÖLÜM

### GEOPOLİMER BETON İÇERİKLERİ

#### 2.1 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu-GGBFS

Yüksek fırın cürufu temelde inorganik yapıdadır. Si (% 30-35), CaO (% 28-35), MgO (% 1-6) ve % 18'den fazla  $Al_2O_3 / Fe_2O_3$  gibi inorganik bileşenleri içerir. Düşük demir içeriğinden dolayı çimentoya benzer bağlayıcı özelliklerin gelişimi ve imalatında güvenle kullanılabilir bir malzemedir (Douglas ve Zerbino, 1986). Çelik fabrikalarından hava soğutmalı cüruf ve granül cüruf gibi iki tür yüksek fırın cürufu üretilmektedir. Çoğu durumda, bu cüruf, granül cüruf formunda üretilir. Cürufun özgül ağırlığı 1200–1300 kg / m<sup>3</sup> aralığında değişen yığın yoğunluğu ise yaklaşık 2.90'dır. Tanecikli cürufun rengi beyazımsıdır.

Betonda kullanılan cüruflar ise, cevherden yüksek fırın demir üretiminden sonra yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı ile fırına beslenir. Cüruf, sıvı demirin üzerinde yüzen sıvı bir tabaka olarak 1300-1600 °C sıcaklıkta oluşur. Daha sonra toplanır ve soğutulur ( Lee, 1974). Soğutma hızı cürufun özelliklerini etkiler. Yavaş soğumaya bırakılırsa, kristalleşerek hemen hemen hiç çimentolama malzemesi içermeyen bir malzeme verir. Yeterince hızlı bir şekilde 800 °C'nın altına soğutulursa, gizli hidrolik çimento olan bir cam oluşturur. Bu madde daha sonra en az yüzde 80'i 45 mikrondan küçük olan çok ince bir toz halinde öğütülür. Bu, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) olarak adlandırılan çimento esaslı malzemedir. Şekil 2.1'de GGBFS malzemesi gösterilmiştir. Genel olarak bu cüruf malzemesi yüksek oranda kalsiyum oksit içermektedir ve bu bileşen betonların dayanım ve durabilite özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Fakat günümüzde cüruf malzemesinin fiyatı geleneksel Portland çimentosuna yaklaşmaktadır ve ayrıca Portland çimentolarının içeriklerinde belirli oranlarda da kullanılmalarından ötürü öğütülmüş yüksek fırın cürufu malzemesi ile üretilen alkali aktif betonlar ayrıca alkali aktivatörlerinde kullanımından ötürü ekonomik olamayacak bir beton üretimi olacaktır. Günümüzde cüruf malzemesinin de kullanımını azaltarak ve hatta hiç kullanmayarak geopolimer beton türleri üretmekte mümkün olmaktadır.



**Şekil 2.1** Öğütülmüş fırın cürufu

### **2.1.1. Betonlarda yüksek fırın cüruf kullanılması**

Betonda geleneksel Portland çimentosu yerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin kullanılmasının birçok faydası vardır. Bunlardan bazıları hem daha ekonomik hem de karbon emisyonlarını azaltığından dolayı daha çevre dostu bir malzemedir ve nihai dayanımı yüksektir (Snellings vd., 2012) . Binaların ömrünü 50 yıldan 100 yıla çıkarabilen iyileştirilmiş uzun vadeli dayanıklılık sayesinde yüksek fırın cürufu, beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.(Malagavelli ve Rao, 2010). Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilmiş betonlar, Portland çimentosu ile yapılan betonlara göre daha yavaş dayanım kazanmaktadır. Fakat daha uzun bir süre boyunca geopolimer betonların basınç dayanımının artması devam etmektedir .(Shen vd., 2013).

## **2.2 Uçucu Kül**

Uçucu kül terimi ASTM standardına göre şu şekilde tanımlanabilir. "Toz halindeki kömürün veya öğütülmüş kömürün yakılması işleminden kaynaklanan ve baca gazları ile taşınan ince ayrıştırılmış kalıntı". Uçucu kül, genellikle kömürle çalışan elektrik ve buhar üreten tesisler tarafından üretilir. Karakteristik olarak, kömür toz haline getirilir ve doğrudan tuttuğu kazanın yanma odasına hava ile üflenir, ısı yaratır ve erimiş mineral bir kalıntı oluşturur. Kazan boruları, kazandan ısı alır, baca gazını soğutur ve erimiş mineral kalıntısının sertleşmesine ve kül oluşmasına neden olur. Uçucu kül olarak adlandırılan daha hafif ince kül partikülleri baca gazında asılı kalır. Dip külü olarak adlandırılan iri kül partikülleri yanma odasının dibine düşer. Uçucu külün beton teknolojisinde kullanımı 1930'lu yıllara dayanmaktadır.(Sengul vd., 2005). Dünya genelinde yılda yaklaşık 450 milyon ton uçucu kül

üretildiği tahmin edilmektedir, ancak mevcut toplamın sadece % 6'sı harmanlanmış çimentolarda veya beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır.(Baker, 1984). Türkiye'de yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton olan 12 aktif kömür yakma santrali bulunmaktadır.

Uçucu kül parçacıkları doğal olarak küreseldir , kireç normal betondan daha incedir, uçucu kül parçacıkların çapı 1 µm ile 150 µm arasındadır ASTM 618-12 ( ASTM, 2012), yanan kömür türünden kaynaklanan kimyasal bileşime bağlı olarak iki ana uçucu kül sınıfını belirtmiştir; C Sınıf ve F Sınıfı olarak adlandırılan iki uçucu Kül türü mevcuttur. F sınıfı uçucu kül genellikle bitümlü kömür veya yanan antrasitten imal edilir, C sınıfı uçucu kül ise genellikle alt bitümlü kömür ve linyitin yakılmasıyla oluşur.(Halstead, 1986).ASTM standardına göre, F ve C sınıfı arasındaki temel fark uçucu küldeki silika, kalsiyum, alümina ve demir içeriğidir. F sınıfı uçucu küldeki kalsiyum miktarı % 20'den daha azdır. C sınıfı uçucu kül, F sınıfına göre daha yüksek kalsiyum içeriğine (kütle olarak % 20-40) sahipken, F sınıfına kıyasla daha düşük miktarda silika ve alüminaya sahiptir. Yüksek CaO etkisi normalde betonda kimyasal reaksiyon hızının artmasına neden olur. Ayrıca, C sınıfı uçucu kül içindeki yüksek kalsiyum miktarı hızlı bir reaksiyona girebilir ve daha uzun priz süresi veya işlenebilirlik gerektiren uygulamalar için uygun olmayabilir. Uçucu kül üzerindeki kimyasal bileşime ek olarak, uçucu külün diğer özellikleri genellikle homojenlik, incelik ve tutuşma kaybıdır (LOI). Tutuşma kaybı, külde kalan yanmamış karbonun bir ölçüsüdür.



**Şekil 2.2** uçucu kül malzemesi

### **2.2.1 Betonlarda uçucu küllerin kullanılması**

Uçucu külün küresel şekli genellikle taze betonun işlenebilirliğini geliştirmeyi destekler, küçük parçacık boyutu ise karışımdaki boşlukların doldurulmasında önemli rol

oyun, yoğun ve dayanıklı beton yapar. Uçucu kül kullanımı, betonda daha iyi işlenebilirlik, dayanıklılık, nihai mukavemet ve aderans gibi birçok özelliği geliştirir. Buna ek olarak, uçucu küldeki ince parçacıklar betonda su salmayı ve ayrışmayı azaltabilir ve bu da özellikle zayıf karışımlarda terleme özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olur. Betonda uygun oranda uçucu kül kullanılarak yeterli ve hatta daha üstün mühendislik performansı elde edilebilir. Örneğin, uçucu kül içeren betonlar genellikle daha yüksek işlenebilirliğe ve daha düşük hidrasyon ısısına sahip betonlardır. Bu, betona önemli bir avantaj sağlar. Uçucu kül içeren betonun uçucu kül içermeyen betona göre erken yaşta daha az basınç dayanımına sahiptir. Bunun sebebi uçucu kül partiküllerinin yavaşça reaksiyona uğramasıdır. Fakat bu reaksiyonlar geleneksel betonlara göre daha uzun sürede geliştiğinden dolayı daha sonraki yaşlarda aşağı yukarı aynı hatta daha yüksek dayanım seviyelerine ulaşabilir. Bu şekilde üretilen betonların çevresel etkiler nedeniyle oluşabilecek bozulmaya daha dirençli olduğu bilinmektedir. (Celik vd., 2014).

Çimento ve uçucu kül birlikte kullanıldığında uçucu külün betonun dayanımına katkısının arttığı görülmüştür. Bu katkı maddesindeki artış, partikül boyutunun küçülmesi ile ilişkilendirilmekte, küçük partiküller betondaki arayüz alanını güçlendirerek yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır. Özellikle C-tipi uçucu küller daha fazla kalsiyum oksit içerdiğinden dolayı çimento ile beraber yüksek dayanım özellikleri göstermektedir. Ayrıca F-tipi düşük kalsiyumlu uçucu küllerse daha az kalsiyum oksit içeriği sebebiyle daha iyi kimyasal durabiliteye sebep olduğu bilinmektedir.

### **2.3. Alkali Aktivatörler**

Sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımları veya sıvı formdaki potasyum hidroksit ve potasyum silikat karışımları, Geopolimer betonların üretilmesinde ve daha iyi dayanım ve durabilite özelliklerine sahip olması açısından tercih edilen aktivatörler arasında yer almaktadır. ( Lee ve Van Deventer, 2007). Potasyum hidroksit, sodyum hidroksitten daha pahalı olduğu için ve temini daha zor olmasından ötürü, çoğu çalışmada aktivatör çözültisi olarak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve sodyum hidroksit karışımı ile üretilen alkali aktivatörler kullanılmıştır.

Chindaprasirt vd. (2007) yaptıkları bir çalışmada, üretmek istediği yeni nesil çevreci geopolimer bağlayıcıda yüksek mekanik özellikler elde etmek için ,sodyum silikat ve sodyum hidroksit arasındaki oranın 0.6-1.0 aralığında olması gerektiğini göstermiştir.

Roy (1999) tarafından yapılan çalışmada alkali aktivatördeki sodyum hidroksit konsantrasyonunun 5M'nin altında olduğunda kullanılan sodyum silikatın betonun dayanım ve durabilite özelliklerine etkisinin daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Álvarez-Ayuso vd. (2008) ise yaptığı çalışma sonucundan sodyum hidroksit konsantrasyonu daha yüksek olduğunda, çözünebilir silikat olmadan bile geopolimerizasyonun sağlanabileceğini göstermiştir . Yani aslında sodyum hidroksit kendi başına sodyum silikat olmadan geopolimer beton üretiminde kullanılabilir.

Son zamanlarda, geopolimer beton araştırmalarındaki yaygın araştırma uygulaması, iki bileşenin değişik oranlarda karıştırılıp uygun miktarlarını belirleyerek aktive edici çözeltinin hazırlanmasını içerir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat, geopolimer betonun karıştırılmasında kullanılmadan önce 24 saat önce bekletilmesini tavsiye etmektedir. Karışımın homojenize olması için ve karışımdan sonra çıkan ısının düşürülmesi için bu önem arz etmektedir. Kuru hidroksit toz formlarının kullanılması ve suya ilave edilmesinin geopolimerizasyon reaksiyonuna istenilen oranlarda izin vermediği ve mukavemet sonuçlarının sıvı bazlı sistemler kadar yüksek olamayabileceği iddia edilmektedir. Bununla birlikte, sahada uygulama için geopolimer beton kullanımı, önceden karıştırılmış çözümler yerine katı aktivatörün şantiye ortamında karışıma dahil edilmesi kullanılabilirlik açısından daha avantajlı olacaktır.

Ismail vd. (2013) yaptıkları bir araştırma katı alkali aktifleştiricileri kullandılar, ancak alkali aktivatör ilk olarak uçucu kül ve cüruf karışımına eklenmeden önce çözüldü .

Guerrieri ve Sanjayan (2010) ise çalışmalarında katı sodyum metasilikat aktivatörü de kullandılar. Yine, araştırmacılar önce bir alkali çözelti yaptılar ve geopolimer karışımına katı formda eklemediler. Geopolimer betonun yalnızca alkali aktivatör içeren katı malzemeler kullanılarak üretilmesi, çok fazla pratik zorluk çekmeden büyük ölçekli geopolimer beton karışımları üretme yolunda çok yararlı olacaktır .



## 2.4 Betonun Dayanıklılığını Etkileyen Kimyasal Reaksiyonlar

### 2.4.1 Asit etkisi

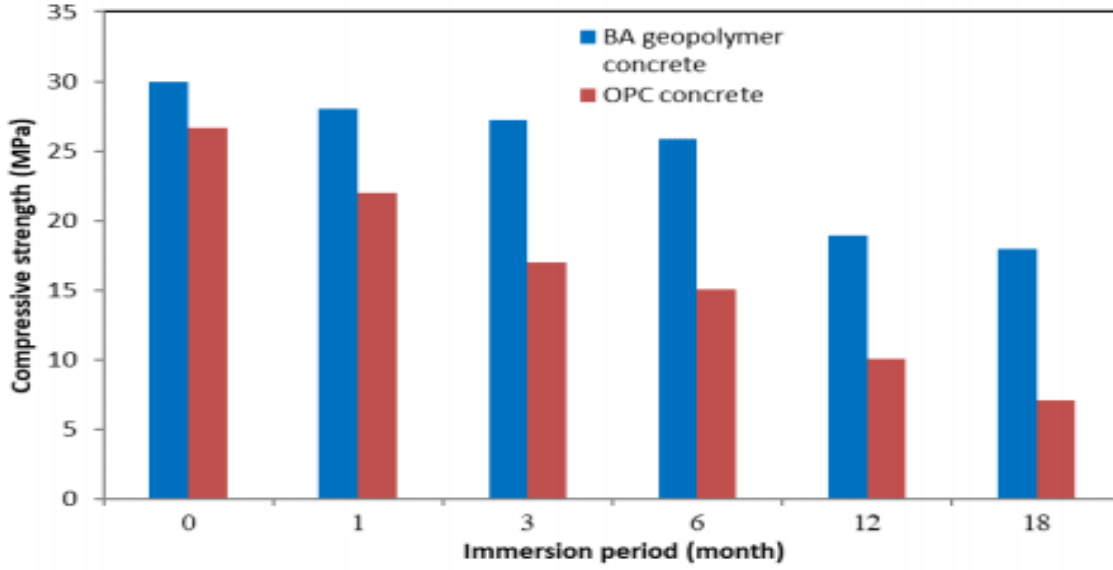
Normal beton, sülfürik asitler, nitrik, asetik ve hidroklorik gibi kimyasal bir saldırıya maruz kaldıklarında çok ciddi kesit kayıplarına uğrayabilir. Altyapı elemanlarında asit hasarlarının en önemli nedeni, kanalizasyon sistemlerinde sıklıkla meydana gelen biyojenik asit korozyonudur.(Baščarevć, 2015). Birçok araştırmacı, Geopolimer betonun kimyasal saldırılara karşı iyi bir durabilite dirence sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Song vd., (2005) alkali aktivatör uçucu külün 8 haftaya kadar % 10 asit solüsyonuna maruz kaldığında yüksek kimyasal dirence sahip olduğunu, mukavemet ve kütledeki kayıpların sırasıyla % 35 ve % 3 olduğunu belirtmiştir ( Şekil 2.3'de gösterilmektedir).

Ayrıca Bernal vd.( 2012), alkalın aktivatör bazlı geopolimer beton normal beton'a göre daha iyi bir sülfürik asit direncine sahip olduğunu, asetik aside 150 gün batırıldıktan sonra basınç dayanımının başlangıç dayanımının % 75'ini koruduğunu bildirdi ve bu da asetik asit saldırısı altında alkali aktive edilmiş çözeltilinin normal beton ile karşılaştırıldığında daha yüksek stabiliteye, düşük CaO / SiO<sub>2</sub> oranına, daha düşük başlangıç geçirgenliğine ve daha yüksek alkaliniteye sahip olduğu gerçeğine işaret etmektedir.

PH seviyesi betonlarda kimyasal durabiliteyi etkileyen önemli bir faktörlerden birisi olarak değerlendirilmiştir ve küçük miktarda PH değişimi, betonun durabilitesini bozan kimyasal saldırıdan birisi olarak kabul edildi. Davidovid ve meslektaşları % 5 hidroklorik ve sülfürik asit solüsyonlarına dört hafta batırıldıktan sonra, alkali ile aktifleştirilen bağlayıcıların yaklaşık % 6-7 oranında kütle kaybına uğradığını, OPC betonun ise % 78-% 95 oranında kütle kaybına uğradığını bildirmişlerdir (Davidovits vd.,1990).

Yapılan çalışmalar geopolimer betonların asit dayanımının OPC beton dayanımlarına kıyasla çok daha iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca beton kesit kaybının geopolimer betonlarda daha az olduğu ve yüzeylerdeki renk değişiminin daha az olduğu ifade edilmektedir.



Şekil 2.3 Sülfürik asidin basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Ariffin vd., 2013)

#### 2.4.2 Sülfat etkisi

Magnezyum sülfat veya sodyum sülfat saldırısı, geopolimer betonun dayanıklılığı için en önemli endişelerden biridir, beton ürünlerinin farklı oranlarda sülfat çözeltisine batırılması nedeniyle beton yüzeyinden başlayarak derinlere doğru bozulmanın başlayacağı ve bunun da betonun durabilitesini önemli ölçüde düşürecektir. Normal betonda magnezyum sülfat veya sodyum sülfat atağı ile ilgili önceki çalışmalardan elde edileb veriler doğrultusunda normal betonun sülfat çözeltileri ile C-S-H arasındaki reaksiyonlar nedeniyle betonda bozulmaların başlayacağı not edilmiştir.

Öte yandan Wallah ve Rangan (2006) yaptıkları çalışmalarında, düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu küllü geopolimer betonlardan ısıyla kürlenmiş numunelerin magnezyum sülfat çözeltisine yüksek direnç gösterdiğini belirtmişlerdir. 365 gün sodyum sülfata batırılan örneklerde çatlama veya dökülme ve yüzeyde bozulma belirtileri görülmemiştir. Sodyum sülfat çözeltisine çeşitli yaşlarda daldırılan Geopolimer betonun uzunluk değişimi başlangıç uzunluğunun % 0,01'inden daha azdır ve farklı sülfat çözeltilerinde en iyi mekaniksel durabilite NaOH ile hazırlanan ve ortam koşullarında kürlenmiş geopolimer betonda elde edilmiştir.

### 2.4.3 Deniz suyu etkisi

Uçucu kül esaslı geopolimer beton, normal Portland çimentolu betonlara göre deniz suyu saldırılarına karşı üstün performansa sahiptir. Bunun nedeni olarak ise uçucu kül içeriğindeki düşük kalsiyum oksittir. Ayrıca geopolimer beton numunelerinin farklı asit ve sülfat ortamlarına karşı da durabilitesinin normal Portland çimentolu betondan daha iyi olduğu not edilmiştir.(Kongvd., 2007). Bu durumu da,geopolimer betonda alüminosilikatların varlığından ve düşük kalsiyum miktarından kaynaklandığı rapor edilmiştir. Geopolimer beton numuneleri, ağırlık kaybı ve mekanik mukavemet kaybı olmadan deniz suyu saldırısı altında dayanıklı olabilir.(Fernández-Jiménez vd., 2007). Dokuz ay deniz suyuna maruz kaldıktan sonra, uçucu kül bazlı geopolimer betonun düşük geçirgenlik ve düşük beton gözenekliliği nedeniyle mekaniksel dayanımın fazla etkilenmediği belirtilmiştir.(Palomo vd., 1999).

Olivia ve Nikraz (2013), geleneksel Portland çimento beton numunelerinin deniz suyu altında bozulmaya karşı daha duyarlı olduğu sonucuna varmışlardır. Deniz suyu ortamlarında ıslanma-kuruma döngüsel ataklar geleneksel beton numunelerinin bozulma oranını hızlandırırken, geopolimer beton numuneleri aynı ıslanma-kuruma çevrimlerine mekanik mukavemet bozulması olmadan daha iyi performans göstermiştir. Bunun nedeni olarak ise geopolimer beton numunelerinin ısı kürlenmeden sonra daha erken dayanım kazanıp boşluk oranının azalmasına bağlanabilir. Ayrıca, uçucu kül bazlı geopolimer betonlar sürekli daldırılmış deniz suyuna maruz kaldıktan sonra marjinal bir kütle değişimi göstermiştir.

## 2.5. Geopolimer Betonun Özellikleri

Geopolimer betonların dayanım ve durabilite performansları, alüminosilikatların kimyasal bileşimi ve alkali aktive edici çözeltilerin konsantrasyonu ve bileşimi, solğsyonların molaritesi, bağlayıcı malzemelerin kullanılma oranları, kür yöntemleri geopolimer betonların hem dayanım hem de durabilite özelliklerinden sorumludur(Sofi vd., 2007).

Doğru karışım tasarımı, hammaddeler ve kürlenme yöntemleri uygulandığında, geopolimer beton numuneleri Portland çimentosu beton karışımlarından daha iyi mekanik performans ve kimyasal direnç gösterir.Geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmesi nedeniyle, ısıyla kürlenmiş geopolimerlerin çoğunda yüksek erken dayanım kazancı ve kürlenme süresinden sonra devam eden basınç dayanımı gözükmemektedir.(Duxson vd., 2007).

Portland çimentolu betonu ise dayanımını büyük ölçüde 28 günde tamamlamaktadır. Bununla birlikte, normal Portland çimentolu betonunun tipik basınç dayanımı değerleri 3000

psi ile 6000 psi (20-40 MPa) arasında değişmektedir. Çalışmalar, geopolimer betonun ise 28 günde 30-60 MPa arasında değişen basınç dayanımları gösterebildiğini bulmuştur. (Jang vd., 2014)

Sofi vd. (2007), geopolimer betonun çekme dayanımının Portland çimentolu beton tarafından beklenebilecek değerlerle tutarlı olduğu, eğilme dayanımı ise genellikle beklenen değerleri aştığını bulunmuştur. Bazı geopolimer betonlar ise ayrıca asit ve yangına karşı iyi durabilite performansı göstermiştir ve klorür penetrasyonuna karşı da dirençlidir. Bazı mühendislik uygulamaları için sorunlara neden olabilecek özelliklerden biri de geopolimerlerin hızlı priz süresidir. Ortam sıcaklıklarında karışım oranlarına bağlı olarak geopolimer betonlar dakikalar içinde sertleşirken Portland çimentolu betonlar için ise priz süresi saatlerce devam etmektedir. Bununla birlikte, hızlı bir şekilde sertleşen geopolimerlerin durabilite performansında bozulma göstermediği ve çoğu zamanda Portland çimentolu betona benzer veya daha üstün mekaniksel özellikler gösterebilmektedir.

## **2.6. Betonların Mekaniksel Dayanıklılığını Etkileyen Faktörler**

### **2.6.1. Betonun büzülmesi**

Büzülme, beton haciminde meydana gelen su kaybı olarak tanımlanır ve geopolimer beton yapılarında bir endişe kaynağıdır çünkü büzülme, çatlaklara neden olur ve eksenel deformasyonlarda önemli sapmalara neden olabilir ayrıca kontrol edilmediği takdirde büzülme çatlakları, betonun eğilme ve kesme dayanımının azalmasına sebep olurlar. (Gilbert, 2002). Büzülme çeşitleri kendi arasında farklılıklar gösterebilir. Genel olarak büzülme kuruma, kimyasal, plastik ve termal büzülme olmak üzere dört türe ayrılabilir.

Kuruma Büzülmesi, beton hacminin zamanla azalmasıdır. Genel olarak, toplam uzun vadeli büzülmenin en büyük oranının miktarıdır. Kuru büzülmeyi etkileyen faktörler, su-çimento içeriği, agrega tipi, maksimum boyut, bağıl nem ve numunenin boyutu ve şeklidir. Numunenin yüzey alanının artması büzülme miktarının artmasına sebep olabilir. Özellikle yüksek sıcaklık ve şiddetli rüzgara maruz büyük yüzeyli beton elemanlarda büzülmenin daha küçük yüzeye sahip beton numunelere göre daha fazla olacağı açıktır. Kuruma büzülmesini engellemenin bir yolu dökülen betonu sürekli ıslak ve nemli tutmak, çeşitli kalıplar yardımıyla beton etrafını sararak rüzgarı engellemek ve eğer mümkünse betonu özellikle akşam ve gece saatlerinde yani güneşin olmadığı zamanlarda dökmek kuruma büzülmesini engellemek için çok önem arz etmektedir. Ayrıca çeşitli süper akışkanlaştırıcı ve elyaf liflerin kuruma rötresini engelleyerek kurumu çatlaklarını sınırlandırdığı bilinmektedir.

Kimyasal büzülmesi ise geleneksel Portland imentosunun hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan büzülmesi olarak bilinir ve bu büzülme miktarı Portland imento miktarının artmasıyla beraber artmaktadır.

Plastik büzülme, suyun buharlaşma ile azalması nedeniyle beton henüz plastik haldeyken meydana gelir. Plastik büzülme, karışımdaki imento ve su içeriği, sıcaklık, ortam bağıl nem ve rüzgar hızı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Termal büzülme ise, imento ve suyun hidrasyonu sırasında açığa çıkan ısının miktarı ile ilgilidir. nceki araştırmalar, kuruma büzülmesinin hidrasyon ısısının doğrudan bir sonucu olduğunu ve artan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  aktivatör dozajı ile arttığını belirtmiştir. Ayrıca, ısıyla kryle dayanım kazanan uçucu küllü geopolimer betonun çok düşük kuruma büzülmesine maruz kaldığı belirtilmektedir. (Wallah ve Rangan, 2006).

### **2.6.2. Alkali - Agregada reaksiyonu**

Alkali agrega reaksiyonu (AAR) , betondaki alkaliler ile agregaların reaktif bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyondur. İlk olarak 1920'lerde Amerika Birleşik Devletleri'nde gözlemlendi ve ilk olarak 1940'ta Stanton tarafından araştırıldı. Alkali agrega reaksiyonu, betona verilen bir tür i kimyasal hasardır ve bu nedenle mühendislik tasarımı ve dikkatli malzeme seçimi ile önlenebilir veya hafifletilebilir. (Stanton, 1942). Alkali-silika, alkali-silikat ve alkali-karbonat reaksiyonları olmak üzere üç tip alkali-agrega reaksiyonu vardır. Alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan bozulma bu reaksiyonlar arasında daha yaygındır

Yaygın olarak "beton kanseri" olarak da bilinen alkali-silika reaksiyonu (ASR), portland çimentosunun hidrasyonu sırasında açığa çıkan alkali-sodyum ve potasyum hidroksit ile agregadaki bazı silisli bileşenler arasındaki reaksiyondur. (Ahmed vd., 2003). Gözenek sıvısını emen ve bunu yaparken genişleyen, beton içinde i gerilimi etkileyen jelatinimsi bir ürün oluşur. Bu, bir yapıda basınç dayanımını kazanmış betona zarar verebilir ve bu hasar sonucunda yapıda önemli onarım ve güçlendirme çalışmaları gerekebilir ve hatta yapının yıkılması bile gerektirebilir. ASR'nin birincil nedeni, alkali çimentonun hidroksil iyonları ile bazı agregaların reaktif silis formları arasındaki reaksiyondur. Bu, su emiliminde genişleyen, çevreleyen betona basınç uygulayan ve donma-çözülme hareketine benzer şekilde onu zayıflatan higroskopik bir jel üretir. ASR, imentonun yüksek alkali içeriğine sahip olması ve rt gibi reaktif bir agrega olması durumunda meydana gelebilir. Ayrıca betonda su bulunmasını gerektirir. ASR, en iyi jel çatlaklarda ve agrega partiküllerinde bulunabileceğinden, betonun mikroskop kullanılarak ince kesitlerde incelenmesiyle tespit

edilir. ASR olasılığını azaltmak için kullanılabilir teknikler arasında düşük alkali Portland çimentosu kullanımı ve beton karışımına puzolanların eklenmesi dahildir. Puzolan ilavesi, karışımdaki çimento miktarı düşüktüğü gözenek sıvısının alkalinitesini azaltır.

### **2.6.3. Yüksek sıcaklıklara ve yangına dayanıklılık**

Portland çimentosu kullanılarak oluşturulan betonlar ısı etkisi altında kaldıklarında zayıf performans gösterirler ve sıcaklık 300°C'yi aştığında bozunmaya başlarlar. Ancak alkali aktif bağlayıcılar ile 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında yüksek stabilite gösterilmiştir. Metakaolin ve şeyl atıklarının aktivasyonu diğer yazarlar tarafından incelenmiş ve termal bir dönemi takiben yüksek mekanik verimlilik göstermiştir.(Pacheco-Torgal vd.,2014). Sıcaklık 60°C ile 100°C arasında olduğunda, numunelerde hafif bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. Bununla birlikte, belirli numuneler için 120°C'de mukavemette bir artış görülmüştür.

Kong ve Sanjayan (2010) tarafından yapılan çalışmada alkali ile aktive edilen metakaolin bağlayıcıları incelenmiştir ,ve Si/Al oranının 80°C'ye kadar kalan dayanımı etkilediği sonucuna varmıştır. Karışımların Si / Al oranı 1.5 ile 1.7 arasında olduğunda daha yüksek artık mukavemet elde edildi.

Krivenko (2003), alkali ile uyarılan bağlayıcıların yangınlara karşı oldukça dayanıklı olduğunu göstermiş ve bu da bu malzemenin tüneller ve yüksek binalar gibi yüksek yangın riski içeren uygulamalarda kullanılabilirliğini ima etmektedir.

### **2.6.4. Döngüsel ıslatma ve kurutma**

Döngüsel ıslatma ve kurutma, beton gözeneklerde sürekli nem hareketine neden olur.(Crumpton vd., 1989). Bu döngüsel etki, betonu sülfatlar, asitler ve klorürler gibi malzemelerin hareketine ve birikimine maruz bıraktığı için betonda durabilite problemlerini hızlandırır.

Beton tamamen kurduğunda veya kısmen kurduğunda ve daha sonra tuzlu suya maruz kaldığında, beton kılcal emme yoluyla tuzlu suyu emer. Beton, bünyesine alabileceği kadar kimyasal emer veya tuzlu su rezervuarı kalmayınca kadar tuzlu suyu emmeye devam edecektir. Bu emilim beton içinde bir noktada durarak betonda bir klorür konsantrasyon gradyanı oluşacaktır. Dış ortam kurursa, saf su gözeneklerden buharlaşır ve başlangıçta çözelti içinde bulunan tuzlar yüzeye yakın gözeneklerde çökebilir .Döngüsel ıslatma ve kurutma, suyun buharlaşmasıyla klorür gibi iyon konsantrasyonlarını artırır. Oksijen, doymuş

betonda önemli ölçüde daha düşük bir difüzyon katsayısına sahip olduğundan, betonun kurutulması, çelik korozyonu için gerekli oksijenin kullanılabilirliğini de artırmaya yardımcı olur. Aslında, havadaki oksijenin çapı, sudaki oksijen difüzyonununun 10.000 katı kadar yüksek olabilir. (Escalante ve Ito, 1990).

Beton kurudukça ve gözenekler daha az doygun hale geldikçe, oksijenin betona yayılma ve korozyonu tetiklemek ve sürdürmek için gerekli seviyeye ulaşma şansı daha yüksek olacaktır. Örneğin; deniz suyunun ıslanmasına ve kurumasına maruz kalan beton yapılar, sürekli olarak deniz suyuna batırılmış beton yapılara kıyasla bozulmaya daha yatkındır. (Al-Tayyib ve Al-Zahrani, 1990). Bunun sebebi ise beton kurduğunda farklı agresif iyonların ve oksijen daha derinlere girerek bozulma derecesinin daha da artmasıdır.

## **2.7. Geopolimer Betonların Dayanımlarına Etki Eden Unsurlar**

### **2.7.1. Silisyum dioksit / sodyum oksit oranı**

Geopolimer betonların dayanımını etkileyen önemli parametrelerden biri sodyum silikat çözeltisindeki  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$  molar oranıdır.  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$  oranı geopolimerizasyon sürecinin geliştirilmesinde en önemli faktörler arasında yer almaktadır

Wang vd. (1994) yaptıkları bir çalışmada  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ 'nun hem dozajının hem de molar oranının geopolimer harcın dayanımı üzerinde önemli bir role sahip olduğunu bulmuştur.

Bondar vd. (2011) ise  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ 'nun daha düşük olmasının geopolimer betonlarda daha yüksek basınç dayanımı gösterebileceğini belirtmiştir. Puzolanları aktive etmek için genel olarak daha yüksek alkali konsantrasyonlu daha düşük silikat oranı önerilir.

### **2.7.2. Geopolimer betonların su muhtevası**

Fang ve Kayali (2013) yaptıkları araştırmasında, geopolimer sisteme eklenen suyun yaklaşık % 10,74'ünün  $105^\circ \text{C}$  yüksek sıcaklıklarda bile buharlaşmaz olduğunu belirtmişlerdir

Zuhua vd. (2009) yaptıkları çalışmalarda ise bu buharlaşmayan su içeriğinin herhangi bir kuruma büzülmesi yaratmadığını, ancak uzun vadeli basınç mukavemetin korunmasına yardımcı olduğunu buldu ve suyun geopolimer reaksiyonunda reaktif olarak davrandığını bildirmiştir. Ayrıca, 1. aşama yüksek su bazlı ortamın iyonların transferini kolaylaştırdığı, 2.

aşamanın hidroliz için su gerektirdiği ve 3. aşama poli-yoğuşma nedeniyle suyu serbest bıraktığı geopolimerizasyonun üç aşamasında suyun rolünü belirlediler.

Panias vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, bağlayıcıdaki katı-sıvı oranının 2.05 g / ml'den daha fazla artması durumunda ise basınç dayanımının azalmaya başladığını göstermiştir. Araştırmacılar ayrıca, bağlayıcının su içeriği çok düşük olduğunda, düşük işlenebilirlik nedeniyle döküm zorluğu nedeniyle geopolimerin basınç dayanımının düşük olabileceğini bulmuşlardır .

Diaz ve Allouche (2010) yaptıkları çalışmalarda, yüksek alkali sıvının sertleşmiş betondaki yüksek gözenekli yapı nedeniyle geopolimer bağlayıcıları zayıflattığını göstermiştir.

### **2.7.3. Isı kürü uygulanması**

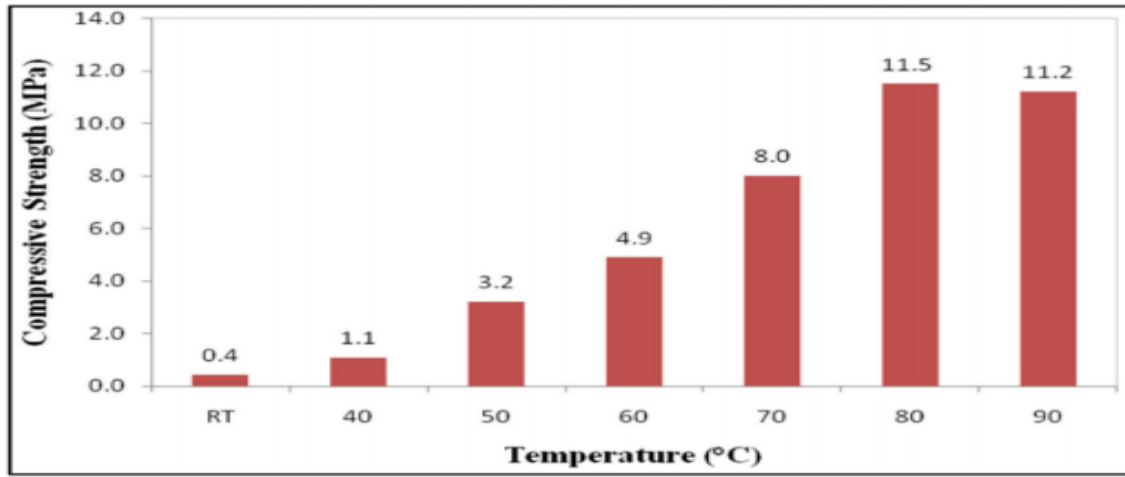
Özellikle uçucu kül ile üretilen geopolimer betonların normal oda sıcaklığında geopolimerizasyon reaksiyonları sonucu dayanım kazanması çok uzun zaman alabilir. Bu sebeple geopolimer betonlardaki geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmak için kullanılan yöntemlerin birisi de ısı kürü uygulamasıdır. Uygulanan ısı kürü geopolimer betonlardaki uçucu külün aktivasyonunu hızlandırmak için gerekli bir işlem olmaktadır. Aksi takdirde uçucu kül içeren geopolimer betonu yüksek dayanıma kısa sürede üretmek gerçekten zordur. Bu nedenle geopolimer betonları kısa sürede üretmek amacıyla numuneler yaklaşık 50 derece üzerinde ve en az bir gün süreyle ısı kürüne tabii tutulur. Geleneksel Portland çimentosu gibi geopolimer beton geopolimerizasyonu, puzolanik malzemenin alkali aktivasyona uğramasıyla beraber bir dış ısı kaynağının eklenmesiyle de daha basit bir şekilde gerçekleştirilir. Isı kür derecesi ve zamanındaki artış, geopolimer betonun basınç dayanımının daha fazla artmasına neden olabilir. Dahası, uzun kürlenme süresi ile alkali aktif hale getirilen betonların mukavemeti artmasına rağmen, ısı kürü sonrasında da numunelerdeki basınç dayanımı artışı yavaşla artmaya devam eder. Önceki araştırmalar, daha uzun kürlenme süresinin polimerizasyon sürecini iyileştirdiğini, daha yüksek basınç dayanımına neden olduğunu göstermiştir.(Rangan vd., 2005).

Isıyla kürlenme, geopolimer iç yapısında meydana gelen kimyasal reaksiyonu önemli ölçüde iyileştirir. Hem kürlenme süresi hem de ısı, geopolimer betonun mekanik özelliklerinden etkilenir. Kür sıcaklığı kuru veya buharla kürlenerek yapılabilir. Önceki araştırmacıların sonuçları, kuru kürlenmiş Geopolimer betonun basınç dayanımını buharla kürlenmiş Geopolimer betonunkinden yaklaşık % 15 daha fazla artırdığını göstermiştir.



Rovnaník çalışmalarında, 90° C'ye kadar sıcaklık artışının geopolimer betonun basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Bu artışın farklı sıcaklıklarda artması Şekil 2.4'de gösterilmiştir.(Rovnaník, 2010).

Lloyd ve Rangan (2010), kürlenme süresindeki artışın polimerizasyon sürecini iyileştirdiğini ve bunun da basınç dayanımının gelişmesine yol açtığını araştırdılar. Basınç dayanımındaki gözle görülür artış 24 saate kadar kürlenme süresine kadar arttığı görülmüştür. Bu nedenle, ekonomik etkileri de düşünerek pratik uygulamalarda önerilen kürlenme süresinin 24 saati geçmemesi tavsiye edilmiştir. Bu ısı kürü sürenin uzuması hem yapılarda bu geopolimer betonların kullanımını zorlaştırmakta hem de uzun süre enerji kullanımı nedeniyle beton maliyeti artmaktadır.



Şekil 2.4 Sıcaklığın geopolimer betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisi(Yahya vd., 2015)

#### 2.7.4. Sodyum silikat/sodyum hidroksit (ss/sh) oranı

Önceki çalışmalar  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  oranının ve  $\text{NaOH}$  molaritesinin geopolimer harcın basınç dayanımını etkilediğini göstermiştir.(Mustafa Al Bakri vd., 2012). Bu artışın olası açıklaması, daha fazla silika jele yol açan ve dolayısıyla yüksek mukavemete katkıda bulunan sodyum silikat kullanımına bağlanabilir.

Hardjito ve Rangan (2005) ayrıca kütlece yüksek bir  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  oranının yüksek basınç dayanımı ile sonuçlandığını iddia etmişlerdir. Kütlece  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  oranı, uçucu kül bazlı geopolimerler için yaklaşık 2,5 olarak önerildi. Tersine,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  oranı 3.0'dan fazla olduğunda, geopolimerizasyon reaksiyonunu geciktiren aşırı alkali içeriği nedeniyle basınç dayanımı azalma eğilimi gösterdi. Çeşitli araştırmalara göre,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , daha fazla Si ve daha yüksek mekanik dayanıma sahip reaksiyon ürününe yol açan

geopolimerizasyon sürecini desteklemektedir.(Pacheco vd., 2008).Basınç dayanımındaki artış, NaOH çözeltisine kıyasla Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisinin SiO<sub>2</sub> içeriğindeki artışa bağlanabilir.

Thokchom vd. (2010) yaptıkları araştırmalarında sodyum oksit içeriğinin sülfürik asitteki geopolimerlerin durabilitesini araştırdılar. Alkali içeriği daha yüksek olan numune, artık basınç dayanımı açısından alkali içeriği düşük olanlara göre çok daha iyi basınç dayanımı performansı göstermiştir. Bu sebeple silikat içeriğinin fazla olması geopolimer betonlarda mekanik dayanımın artmasını sağlamaktadır.

### **2.7.5. Sodyum Hidroksitin Molaritesi**

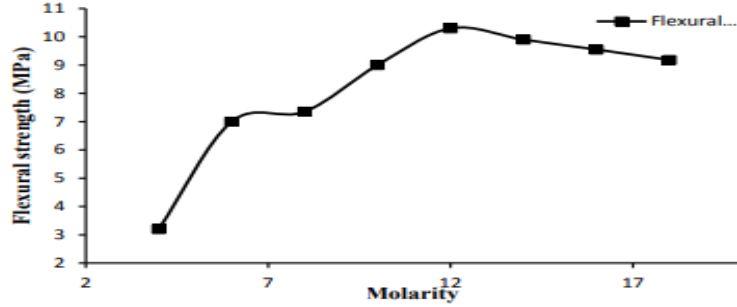
NaOH konsantrasyonu, geopolimer beton numune karışımı için en önemli etkilerden biridir ve alümina-silikatın çözünürlüğü, NaOH konsantrasyonundaki artışla olumlu olarak gelişir. NaOH'nin molaritesindeki artış, kimyasal çözünmenin hızlanmasına yol açar ve de reaksiyon sırasında ettrinjit ve CH oluşumunu en aza indirir.(Wang vd., 2004).NaOH çözeltisinin yüksek molaritesi, geopolimer betonun yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanır.

Hardjito vd. ( 2008) yaptıkları bir çalışmada, NaOH konsantrasyonunun uçucu küllü geopolimer beton harcının basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Hardjito, alkali konsantrasyonu artışının geopolimer beton harcının basınç dayanımı ile orantılı olarak arttığını belirtmiştir. Ayrıca başka bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş ve molar konsantrasyondaki artışın geopolimer beton harcının basınç dayanımını artırdığını belirtmişlerdir.

Hongling Wang vd., (2005) metakaolin bazlı geopolimer betonun mekanik özelliklerini inceledikleri araştırmalarında, NaOH çözeltisinin daha yüksek konsantrasyonunun metakaolin için daha iyi çözülme kabiliyeti sağladığını ve monomer için daha reaktif bağ oluşturduğunu bildirmişlerdir. Metakaolini NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> çözeltisi ile aktive eden metakaolin bazlı geopolimerin mekanik özelliklerinin büyük ölçüde NaOH çözeltisinin molaritesine bağlı olduğunu keşfettiler. NaOH konsantrasyonundaki artışla birlikte, ortaya çıkan geopolimer betonun eğilme dayanımı Şekil 2.5'te gösterildiği gibi artmıştır.

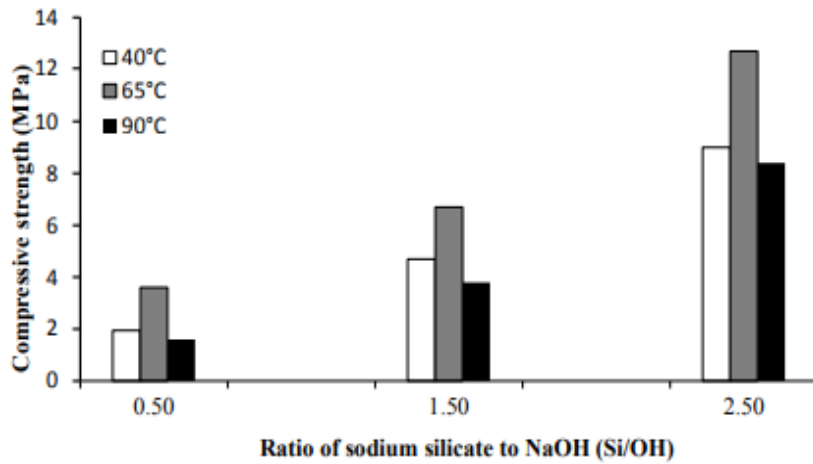
Patankar vd., (2014), NaOH çözeltisinin konsantrasyonunun, 40, 60, 90 ve 120 ° C'de bir fırında 24 saat süreyle kürlenene ve 0,35'lik alkaninaktivatör/ uçucu kül oranı için üç gün ısı kürlenmesinden sonra test edilen Geopolimer beton harcının basınç dayanımı üzerindeki etkisini bildirmişlerdir. Geopolimer betonun basınç dayanımının, tüm sıcaklıklar için NaOH çözeltisinin molar konsantrasyonundaki artışla arttığı, buna rağmen mukavemet artış oranının NaOH'nin farklı molaritesi nedeniyle farklı olduğu tespit edilmiştir. Mukavemet artış oranı,

tüm NaOH konsantrasyonları için 60 ile 90 ° C ve 90 ile 120 ° C'ye kıyasla 40 ve 60 ° C'de daha yüksektir. Bununla birlikte, geopolimer harcının NaOH'nin 13.11 M konsantrasyonunda ve üzerinde basınç dayanımında önemli bir değişiklik yoktur. Sıkıştırma problemi yaratan yüksek NaOH konsantrasyonunda çok viskoz bir karışım oluşumundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca 2.91 M'lik hafif NaOH konsantrasyonunun düşük mukavemet verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.5 NaOH molaritesinin GPC'nin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün NaOH'ye oranı ve SiO<sub>2</sub> / Na<sub>2</sub>O oranı geopolimer betonun dayanıklılığı ve mekanik özellikleri üzerinde etkisi vardır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) oranının artması geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımını artırmıştır. Şekil 2.6'da SS/SH oranının 0.5'den 2.5'a artması beton basınç dayanımını yaklaşık 3 kat artırmaktadır. Geopolimer betonlardaki en optimum ısı kürünün ise 65 derecelerde olduğu görülmektedir. Daha fazla sıcaklığın artması geopolimer beton basınç dayanımının artması yerine azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 2.6 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranının geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi (Rukzon ve Chindapras, 2014)

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### DENEY YÖNTEMİ

Çalışmamızda üretmiş olduğumuz geopolimer beton numunelerinde kullandığımız malzemelerin miktarı ve özellikleri, geopolimer betonlara uygulanan deney yöntemleri ve bu deneylerin performansına dair bilgi verilmektedir.

#### 3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1 Uçucu Küller

Uçucu küller, kömür ile çalışan elektrik santralinde yan ürün olarak üretilen, çoğunlukla küresel, camsı parçacıklardan oluşan ince gri bir tozudur. Bu çalışma süresince kullanılan F-tipi düşük kalsiyum içerikli uçucu kül Şekil 3.1’de gösterilmektedir .Tablo 3.2’de ise bu malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirtilmiştir.



Şekil 3. 1 Çalışmada kullanılan F-tipi uçucu küller

Tablo 3. 1 F- tipi uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliği

İçerik	Sonuç
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>

### 3.1.2. Agrega Özellikleri

Bu deneyde kullanılan iri agrega, boyutları 4 ile 16 mm arasında değişen No I ve No II olarak iki gruba ayrılmıştır. İnce agrega olarak tane boyutu 4 mm'den küçük olan kum ve kırma kum olarak iki gruba ayrılmıştır. Kullanılan iri ve ince agregalar sırasıyla şekil 3.2a ve 3.2b'de gösterilmektedir. Tablo 3.2'de agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri belirtilmiştir.



(a)

(b)

**Şekil 3. 2** Çalışmada kullanılmış iri ve ince agregalar (a) iri agrega (b) ince agrega

**Tablo 3.2.** Çalışmada kullanılan agreganın özelliği

Özellikler	1 nolu agreg	2 nolu agreg
Dane yoğunluk	$2,71 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$	$2,72 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$
Su emmesi	% 0,7	% 0,6
Yassılık endeks	% 14,0	% 9,0
İri agreg parçalanmasına karşı direnç	% 20	% 20

### 3.1.3. Alkali Solüsyon Kullanımı

Çalışmamızda sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat solüsyonu ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) karışımından alkali aktivatör olarak hazırlandı. Bu çalışmada, sodyum silikat, Potasyum silikattan daha ucuz olduğu için kullanılmıştır. Sodyum silikatın kimyasal bileşimi Tablo 3.3'te sunulmuştur. Sodyum hidroksit ise % 97-98 saflıkta yerel bir kimya firmasından elde edildi ve laboratuvarında 14 M sodyum hidroksit çözeltisi olarak hazırlandı. 14M NaOH çözeltisi, oluşan yüksek sıcaklığı düşürmek için karışımdan 6 saat önce hazırlanmıştır. Kullanılan sodyum hidroksit, Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.3.** Kullanılan Sodyum silikat aktivatörünün özelliği

Bileşenler	Değerler
%SiO <sub>2</sub>	%22 - %25
%NaO <sub>2</sub>	%10 - %12
Yoğunluğu	1,39 g/cm <sup>3</sup>
Görünümü	Renksiz, belirsiz ve viskoz sıvı



Şekil 3.3. Sodyum hidroksit (NaOH)

#### 3.1.4. Kimyasal Akışkanlaştırıcı

Harcın işlenebilirliğini sağlamak için deneylerde kimyasal katkı kullanılmıştır ve Şekil 3.4 de gösterilmiştir. Tablo 3.4'de ise Kimyasal katkı maddesinin adı ve özellikleri de belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullandığımız kimyasal akışkanlaştırıcı



**Tablo 3.4.** Çalışmada kullanılan kimyasal akışkanlaştırıcı özelliği

Özellik	İçerik
Ürün	YAPRHEO HYPER SCC 900
Renk	Opak
Durumu	Sıvı
Yoğunluğu	1,069 g/cm <sup>3</sup>
Katı maddelerin ağırlık miktarı	31,93 %
Suda çözünebilen klor miktarı	0,0376 %
pH	6,03

## 3.2. Deney Yöntem

### 3.2.1 Küp Kalıp

Çalışmada, 150 X 150 X 150 mm boyutlarında küp kalıplar kullanılmıştır. Betonların kolayca kalıptan çıkmasını sağlamak için, beton dökümünden önce kalıplar temizlendi ve yağlama işlemi yapıldı. Numunelerin birbirleriyle karışmamasını sağlamak için, beton dökümü öncesi kalıpların alt kısmına numaralandırılmış kâğıtlar yerleştirildi. Şekil 3.5' te deneyde kullanılan kalıplar gösterilmiştir.

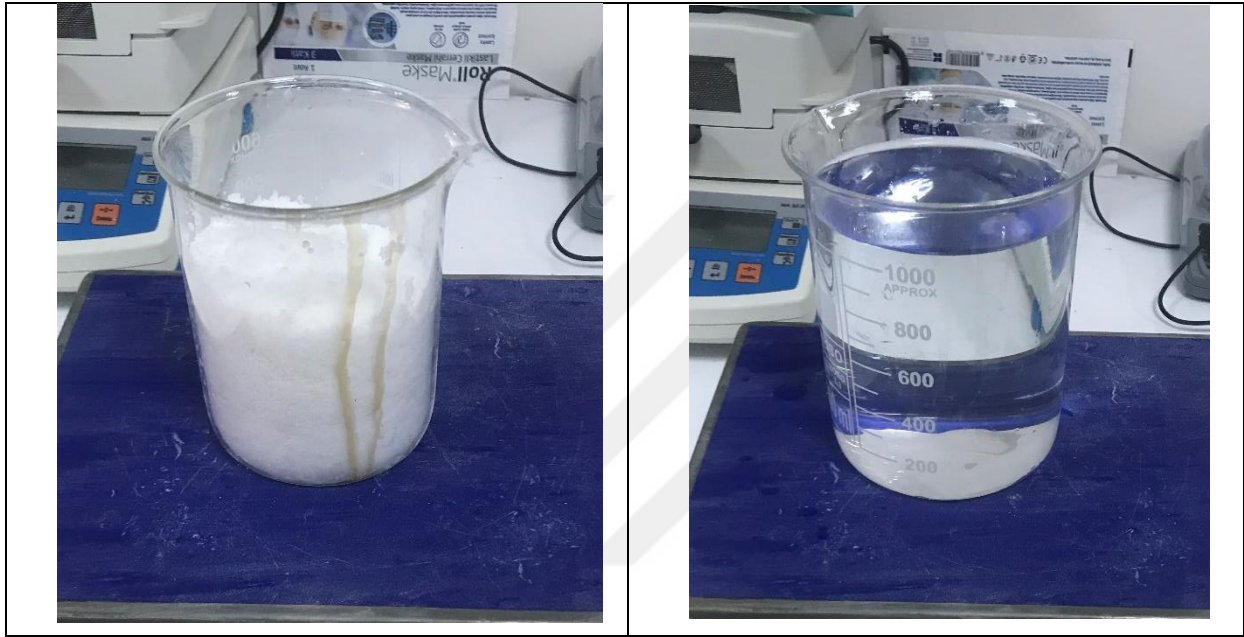


**Şekil 3. 5** Çalışmada kullandığımız kalıplar



### 3.2.2. Alkali Solüsyon Hazırlığı

Sodyum hidroksitle ile sodyum silikatın karışımı deneyde bir alkalın aktivatörü olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada 14 M sodyum hidroksit kullanılmıştır , 1482 gr sodyum hidroksit solüsyonu hazırlamamız için, 525 gr sodyum hidroksit ve 957 gr su karışımı ile hazırlandı. Döküm esnasında oluşan yüksek ısıyı düşürmek için , çözelti laboratuvar ortamında beton dökümünden yaklaşık 6 saat önce hazırlandı. Şekil 3.6’de deneyde hazırladığımız alkali solüsyonu gösterilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 3. 6 Alkali solüsyonların hazırlığı

### 3.2.3. Karışımların Belirlenmesi

Deney kapsamında çimentonun yerine düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül kullanılarak geopolimer beton üretilmiştir. Ayrıca, alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Tablo 3.5 – 3.10’da 1 m<sup>3</sup> beton elde etmek için deneyde kullanmış olduğumuz malzemelerin miktarları ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Deneyde %100 F-tipi uçucu kül bağlayıcı olarak kullanıldı. Bağlayıcı ağırlıkları olarak 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup>, ve 600 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere üç farklı miktarda seçilmiştir. Alkali solüsyon/ bağlayıcı oranları 0.45 ve 0.55 olacak şekilde iki farklı oranda kullanılmıştır.

**Tablo 3.5.** FA100-400-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kaba agregalar	No 1	464
	No 2	464
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	298
	Kırma Kumun Miktarı	298
F-tipi kül		400
Süperakışkanlaştırıcı		4.50
Sodyum silikat		128.57
Sodyum hidroksit		51.43
İlave Suyun Miktarı		30

**Tablo 3.6.** FA100-400-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kaba agregalar	No 1	432
	No 2	432
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	277
	Kırma Kumun Miktarı	277
F-tipi kül		400
Süperakışkanlaştırıcı		4.50
Sodyum silikat		157.14
Sodyum hidroksit		62.86

İlave Suyun Miktarı	30
---------------------	----

**Tablo 3.7.** FA100-500-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kaba agregalar	No 1	382
	No 2	382
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	246
	Kırma Kumun Miktarı	246
F-tipi kül		500
Süperakışkanlaştırıcı		3
Sodyum silikat		160.71
Sodyum hidroksit		64.29
İlave Suyun Miktarı		37.50

**Tablo 3.8.** FA100-500-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kaba agregalar	No 1	342
	No 2	342
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	219
	Kırma Kumun Miktarı	219
F-tipi kül		500
Süperakışkanlaştırıcı		3

Sodyum silikat	196.43
Sodyum hidroksit	78.57
İlave Suyun Miktarı	37.50

**Tablo 3.9.** FA100-600-0.45 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

Malzemeler		Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kaba agregalar	No 1	300
	No 2	300
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	193
	Kırma Kumun Miktarı	193
F-tipi kül		600
Süperakışkanlaştırıcı		1.2
Sodyum silikat		192.86
Sodyum hidroksit		77.14
İlave Suyun Miktarı		45

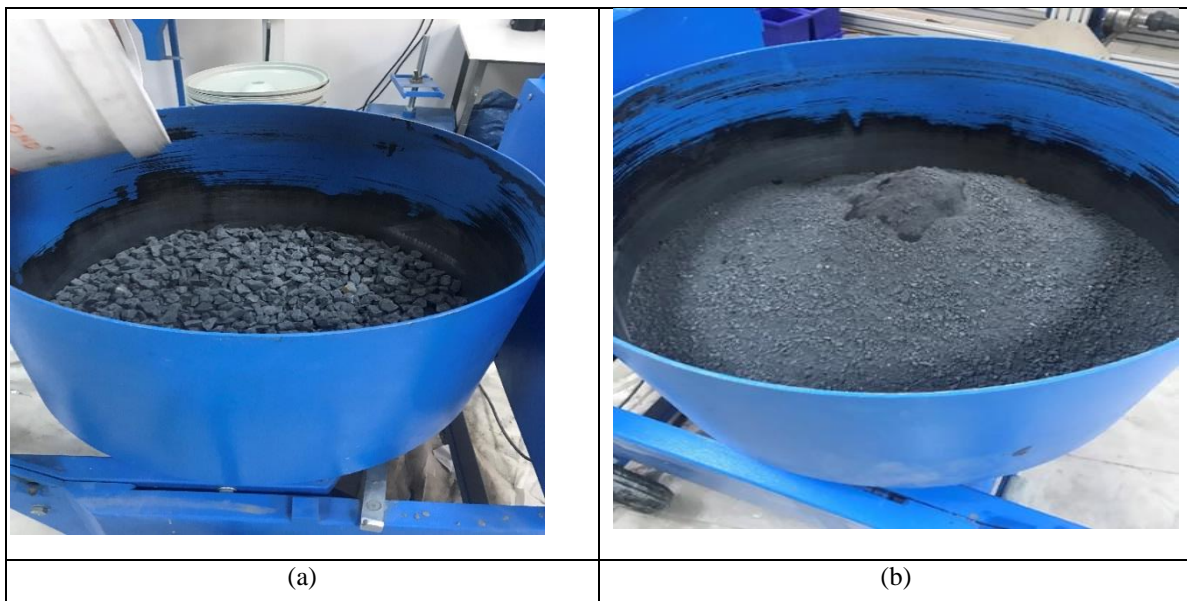
**Tablo 3.10.** FA100-600-0.55 Geopolimer numunelerde kullanılmış malzemelerin miktarı

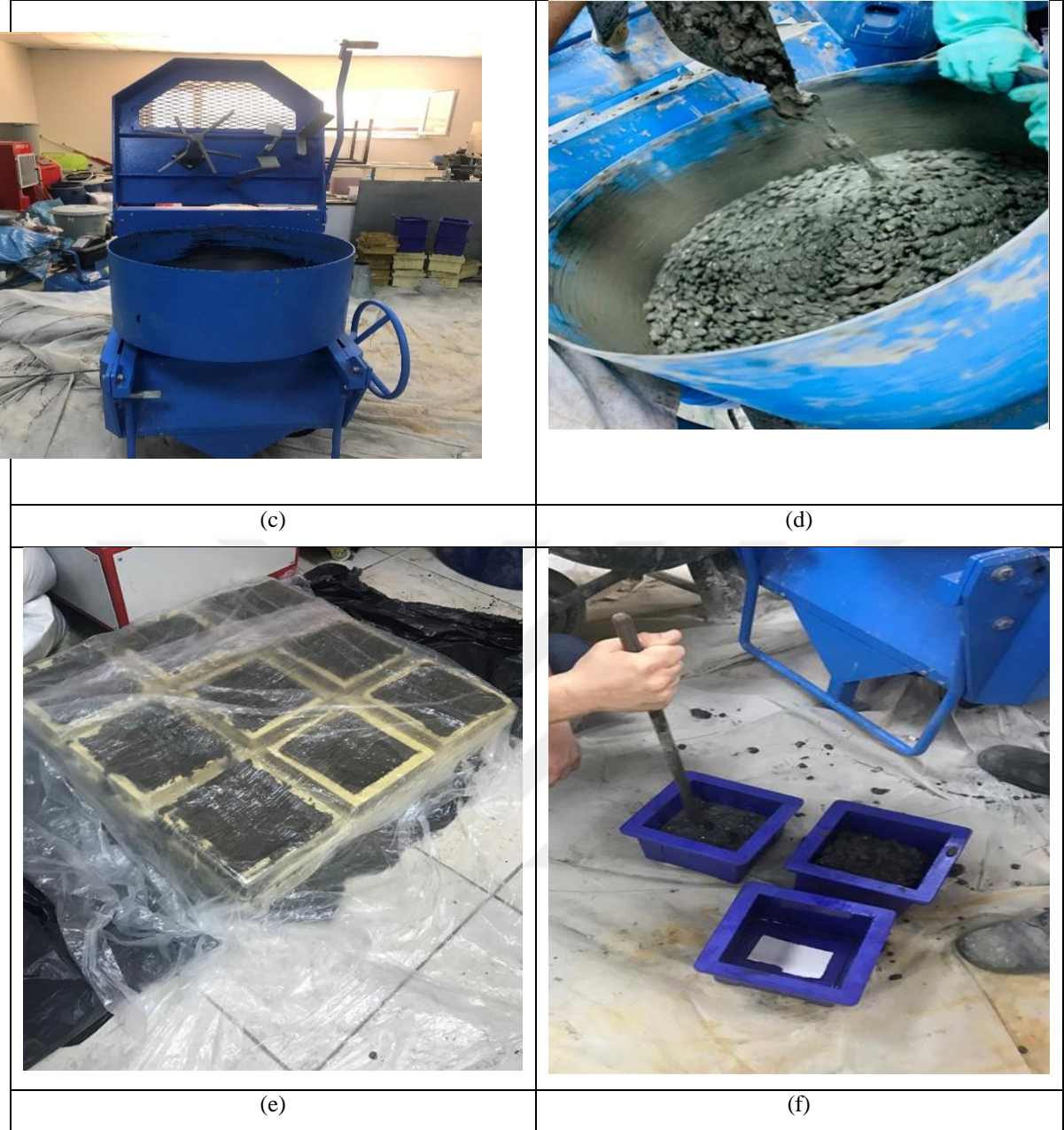
Malzemeler		Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Kaba agregalar	No 1	252
	No 2	252
İnce Agregalar	Kumun Miktarı	161
	Kırma Kumun Miktarı	161

F-tipi kül	600
Süperakışkanlaştırıcı	1.2
Sodyum silikat	235.71
Sodyum hidroksit	94.29
İlave Suyun Miktarı	45

### 3.2.4. Geopolimer Betonların Üretilmesi Ve Dökümü

Geopolimer betonların üretilmesinde homejen bir karışım olabilmesi için önce iri agrega mikserin dibine, ardından ince agrega yerleştirilmiştir. Bu kuru malzemeler ortalama iki dakika karıştırıldı. Daha sonra ilave edilen kimyasalın yarısı, iki ayrı kaptaki hazırlanan alkali aktivatörler kullanılarak karışıma ilave edildi ve iki dakika karıştırıldı. Daha sonra kalan katkı maddesinin yarısı ilave su ile başka kaptaki karıştırıldı, ardından mikserde eklendi ve tekrar iki dakika karıştırıldı. Homojen karışıma ulaşıldıktan sonra iki aşamada daha önce yağlanmış olduğumuz küp kablara yerleştirilir. Betonda herhangi bir hava boşluğu olmaması için şişleme ve tokmaktama işlemi yapıldı. Geopolimer betonun üst yüzeyleri mala ile düzleştirilerek pürüzsüz bir yüzey elde edildi. Alkalin aktivatörlerin buharlaşmasını önlemek için kalıpların üstü plastik naylon ile kapatılmıştır. Geopolimer beton döküm aşamaları Şekil 3.7’ da detaylıca gösterilmektedir.





**Şekil 3.3** Geopolimer betonların döküm süreci

### 3.2.5. Kür Yöntemi

Üretilen beton numuneleri kalıptan çıkarıldıktan sonra mekanik ve dayanıklılık testleri yapılana kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Numunelerin bir kısmını (90 gün laboratuvar ortamında ) diğer kısmı ise (88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında) kürlendi. Fırın kürüne maruz bırakılan beton numuneleri soğuyana kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Ardından basınç dayanımı testleri yapılması için beton numuneleri belirlenen zamana kadar laboratuvar ortamlarında bekletildi.



### 3.2.6. Sülfürik Asit Solüsyon Hazırlıkları

Laboratuvarda kürlenene beton numunelerinin (88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında )ve (90 gün laboratuvar ortamında )ağırlık ölçümleri yapıldıktan sonra önceden hazırlanmış olduğumuz % 5 sülfürik asit solüsyonlu kovalara yerleştirildi. Numuneler asitte 28 gün bekledikten sonra muhafaza edildikleri kovalardan çıkarılıp 24 saat kurması amacıyla ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra asite maruz kalan numunelerin ağırlıkları tartıldı, dış-yüzey fotoğrafları çekildi ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirildi. Sülfürik asit çözeltisinin hazırlanması, numunelerin kovalarda bekletilmesi Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Numunelerin sülfürik asit solüsyonunda bekletilmesi

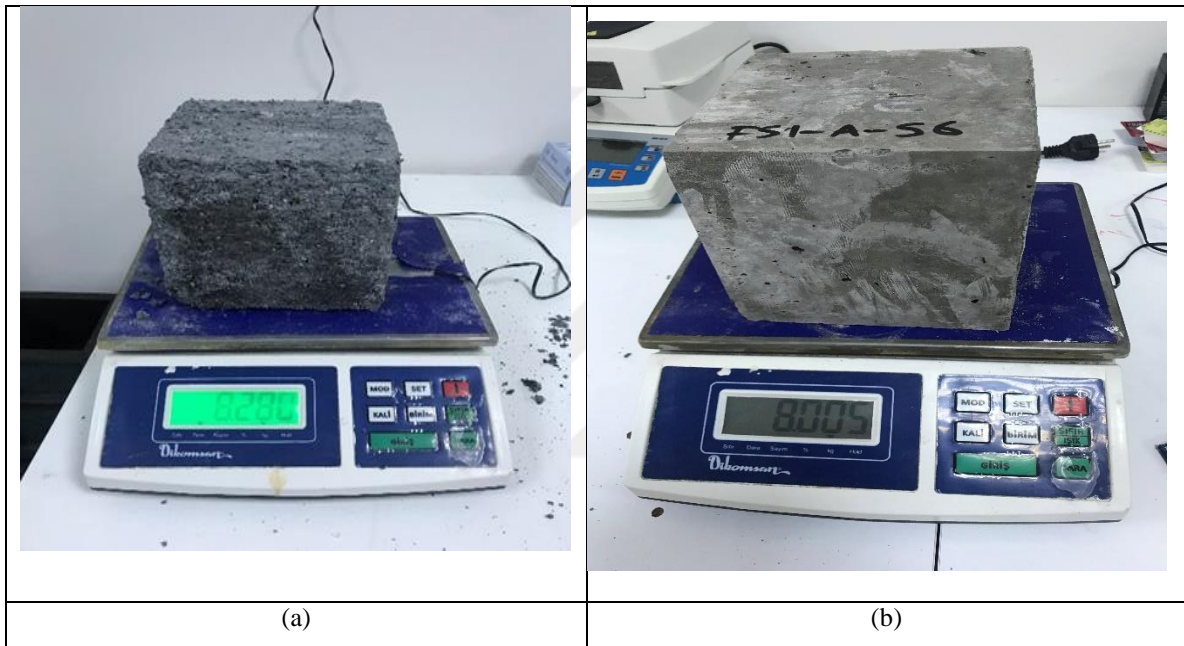
### 3.2.7. Geopolimer Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim

Üretmiş olduğumuz numunelerin başlangıç ağırlıkları sülfürik asit solüsyonuna maruz bırakılmadan evvel tartıldı. Daha sonra sülfürik asit içindeki numuneler, 28.gün sonunda çıkarıldı ve 24 saat kurumaya bırakıldı. Şekil 3.9'de görüldüğü gibi sülfürik aside maruz bırakılan beton numuneleri tek tek tartıldı ve başlangıç ağırlıkları ile karşılaştırılarak aşağıda bulunan formülleri kullanarak numunelerin ağırlıklarındaki değişimler hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlıktaki yüzde değişim} = [(D-C)/C] \times 100 \quad (3.1)$$

C: İlk numunelerin ağırlıkları

D: Sülfürik asit sonrası numunelerin ağırlığı



Şekil 3.9. Sülfürik aside maruz kalan beton numunelerinin ağırlıklarının belirlenmesi

### 3.2.8. Geopolimer Numunelerde Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Yapılan çalışmalar betonların diğer özelliklerinin basınç dayanımları ile doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Bu sebeple betonların genel özellikleri hakkında bilgi geopolimer betonlar üzerinde yapılan basınç dayanımı testleri ile belirlenip, diğer mekanik özellikler ile ilişki kurulabilir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen basınç mukavemeti testleri AS1012.9-1999 standardına göre yapılmıştır. Kapasitesi en fazla 2000 kN olan bir basınç test cihazı kullanıldı. Numunelerin 0.6 MPa/s kuvvet kontrollü olarak yüklenmesi sonucu elde edilen en büyük kuvvet numune alanına bölünerek geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı MPa (N/mm<sup>2</sup>) biriminden belirlendi. Basınç testine tabi tutulan numunelerin



fotoğrafları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Burada geopolimer beton küp numunesi tek eksenli gerilme altında aksel olarak yüklenmektedir. Basınç test cihazının numuneyi sıkıştırarak numunenin kışalmasına sebep olmaktadır. En son betonda kışalma/şekil değıştirme betonun şekil değıştirme kapasitesini geçtiğinde numune çatlayarak yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %15 civarı azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.10. Basınç dayanımı testleri

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

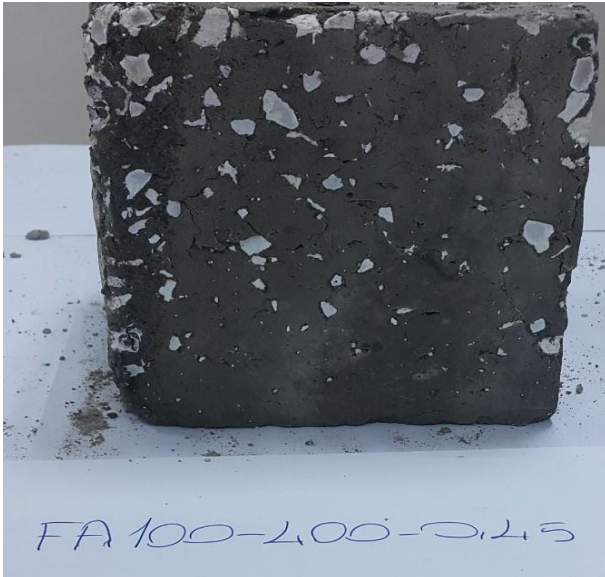
### BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, laboratuvar ortamında ve% 5 sülfürik asit etkisi altında% 100 F-tipi uçucu kül kullanarak ürettiğimiz beton numunelerinin mekanik performansı ve dayanıklılığı incelenmiştir. Çalışma kapsamında uçucu kül 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> ve 600 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere üç farklı miktarda seçilmiştir. Alkali solüsyon/ bağlayıcı oranları 0.45 ve 0.55 olacak şekilde iki farklı oranda kullanılmıştır. Sülfürik asidin numuneler üzerindeki etkisinin ardından geopolimer numunelerin dış yüzeylerindeki sülfürik asit etkisine bağlı yüzey değişimi, numune ağırlıklarındaki azalma/artma ve basınç dayanımındaki azalma gibi durumlar etraflıca irdelenmiştir.

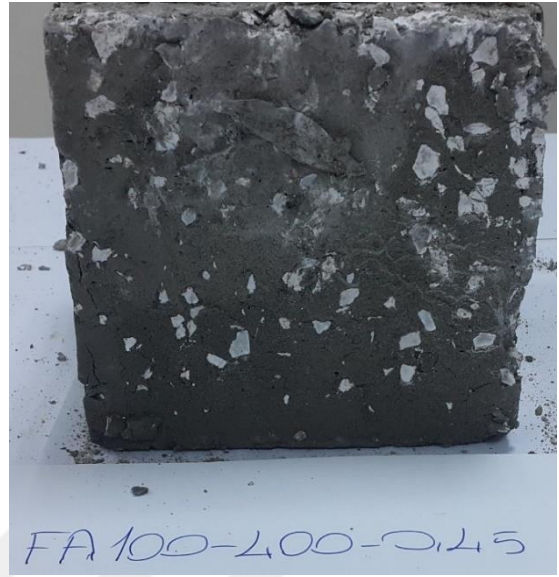
#### 4.1. Numunelerin Görsel İncelemesi

Üçüncü küllü alkali aktive edilmiş betonların, laboratuvar ortamında 90 gün, (88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında ) kürlendikten sonra % 5 sülfürik asit ortamlarında (28 gün) bekletilen geopolimer betonların dış yüzeylerindeki sülfürik asit etkisine bağlı yüzey değişimleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sülfürik asite tabii tutulan numunelerin dış yüzeylerinde alçıtaşı oluşumu sebebiyle bozulma ve beyaz lekeler görülmektedir. Monosulfoalüminat ve kalsiyum hidroksit arasındaki kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan beyaz alçı kristali tabakası nedeniyle, asit içinde bekletilen numunelerin yüzeyinde korozyon meydana gelir. Oluşan bu alçıtaşı ürünleri betonun dış yüzeylerini yumuşattığı için pul pul dökülmeye ve ardından basınç dayanımının azalmasına neden olur. Yüzeyde beyaz lekeler ve çatlakların artması, bozulmanın daha fazla olduğunu göstermektedir. Betonun rengi griden beyaza dönmeye başlamıştır. Geopolimer numunelerin dış yüzey görüntüleri Şekil 4.1'de göstermektedir. Sonuçlar detaylıca incelendiğinde, en az yüzeydeki bozulmanın 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu küllü geopolimer betonda oluşurken, en fazla bozulma ise 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu küle sahip geopolimer betonda meydana gelmiştir. 0.45 ve 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı oranı incelendiğinde ise bozulma miktarları arasında çok belirgin bir fark gözükmemektedir. 88 gün kür ortamında bekletilen ve daha sonra ısı kürü uygulanan numuneler ike ısı kürü uygulanmayan numuneler karşılaştırıldığında ısı kürüne maruz kalan beton numune yüzeylerinde gözle görülür çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar ısı kürü sonrası numunelerdeki büzülme çatlağına benzemektedir.

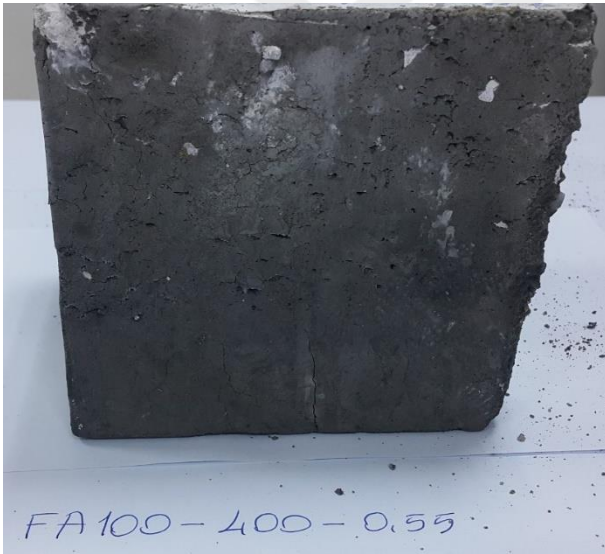
**88C20 -28A**



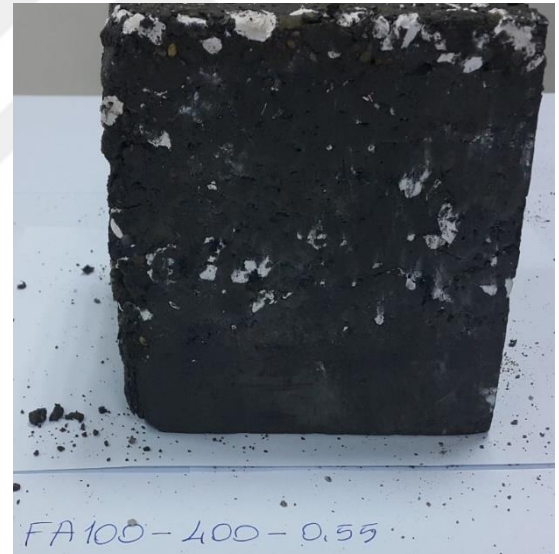
**90C-28A**



**FA100-400-0.45**



**FA00-400-0.45**



**FA100-400-0.55**

**FA100-400-0.55**





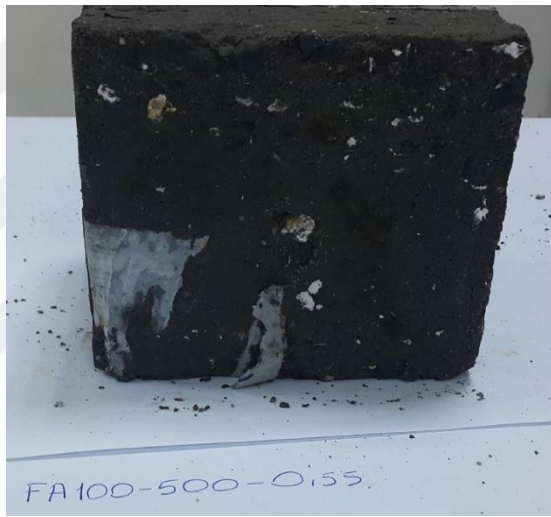
**FA100-500-0.45**



**FA100-500-0.45**



**FA100-500-0.55**



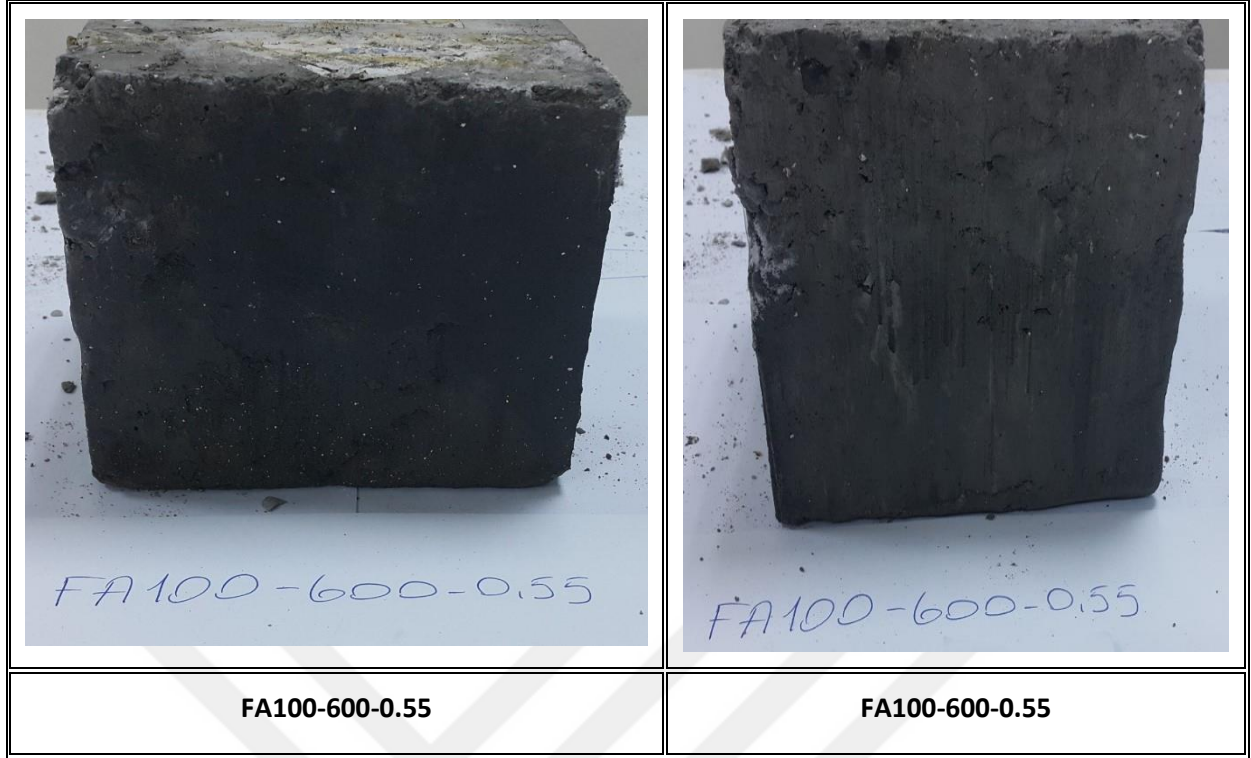
**FA100-500-0.55**



**FA100-600-0.45**



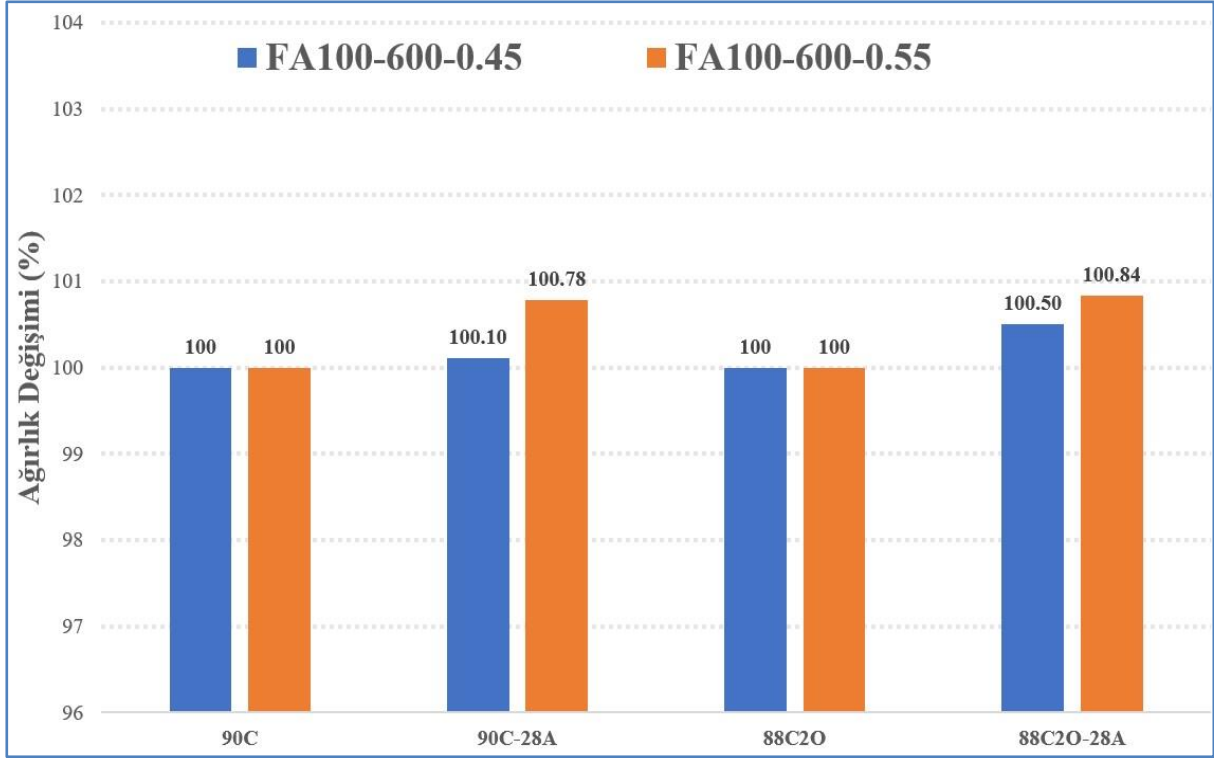
**FA100-600-0.45**



**Şekil 4.1** %5 Sülfürik asite maruz bırakılan betonların görsel incelenmesi

#### 4.2. Numunelerin Ağırlıklarındaki Değişim

Zamanla numune ağırlığındaki değişiklikler betondaki bozulma miktarını gösterir. Uçucu kül miktarı  $600 \text{ kg/m}^3$  olan 0.45 ve 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerinde meydana gelen ağırlık değişimi Şekil 4.2' de gösterilmektedir. Şekilde bulunan C harfi laboratuvar (kontrol) ortamı anlamına gelirken, A ise %5 sülfürik asit ortamını işaret etmektedir. Grafikte 90C, 90 gün kontrol (laboratuvar ortamı) ortamında tutulan-ısı kürüne maruz kalmamış numuneleri göstermektedir. 90C-28A ise 90 gün laboratuvar ortamında kürlendikten sonra 28 gün asit ortamında tutulan beton numunelerini ifade etmektedir. 88C2O 88 gün kontrol ortamında + 48 saat  $70^\circ\text{C}$  fırında bekletilen beton numunelerini temsil etmektedir. 88C2O -28A ise 88 gün kontrol ortamında ve 48 saat  $70^\circ\text{C}$  ısı kürü uygulanmış betonların daha sonra 28 gün sülfürik asitte tutulduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.2. FA100-600 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.2’de uçucu kül miktarı  $600 \text{ kg/m}^3$  olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin laboratuvar (kontrol) ortamında ve %5 sülfürik aside maruz kaldığı ortamlardaki ağırlıklarında artma yada azalma gibi olan değişimleri gösterilmiştir. Ağırlıkta artmanında azalmanın da fazla olması betondaki bozulma miktarının fazla olduğu göstermektedir. Grafiği incelediğimizde, 90 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra 28 gün asite bırakılan 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.1 artmıştır. Benzer şekilde, 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen sonra 28 gün asite bırakılan 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.78 artmıştır. Ayrıca 88 gün laboratuvarında kürlenmiş ve son iki gün ısı kürü uygulanan ve 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.5 artarken 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.84 artmıştır. Sonuçlar incelendiğinde  $600 \text{ kg/m}^3$  uçucu kül miktarına ve 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin ağırlığı, 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin ağırlığına göre biraz daha fazla artmıştır. 88C2O-28A (gecikmiş ısı kürü uygulanmış) ile 90C-28A (ısı kürü uygulanmamış) geopolimer numuneleri karşılaştırıldığında

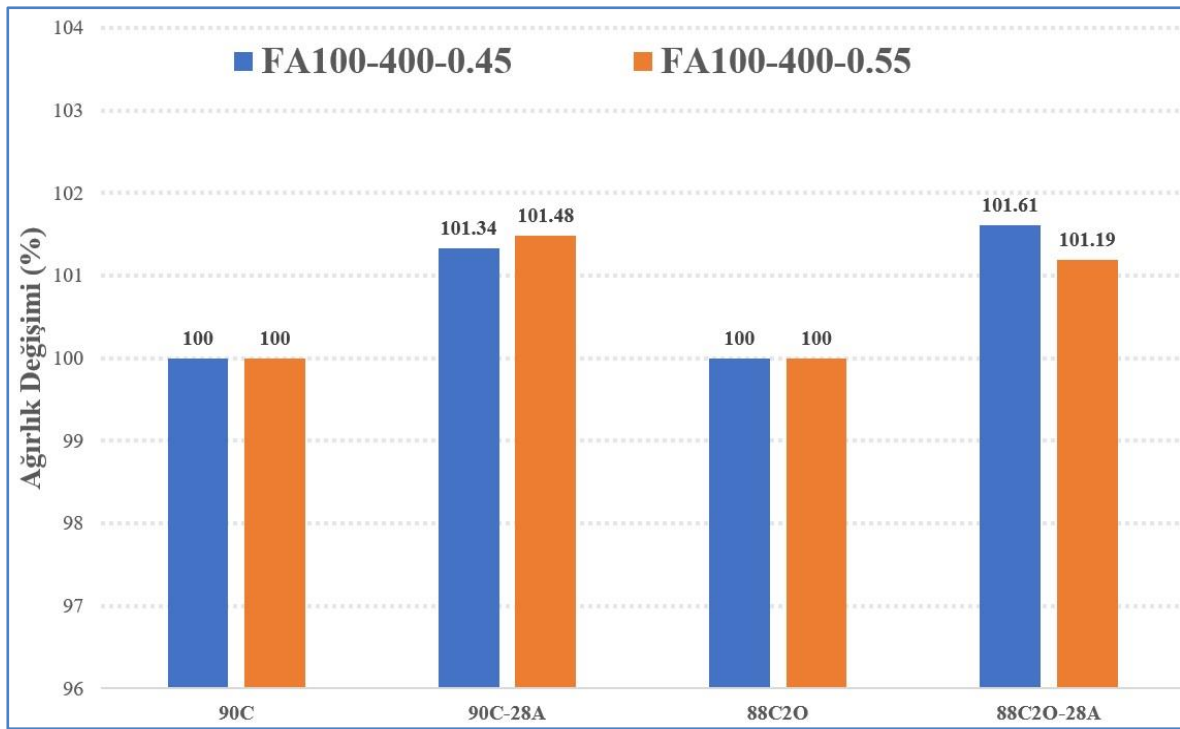
ise ısı kürü uygulandıktan sonra asite maruz bırakılan numunelerin ağırlığı ısı kür uygulanmayanlara göre biraz daha fazla artmıştır. Fakat ağırlık değişimleri her iki durumda da çok belirgin değildir. Numunedeki ağırlık artışı sülfürik asit emiliminden dolayı kaynaklanmaktadır.



**Şekil 4.3** FA100-500 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.3’ de ise uçucu kül miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  olan alkali aktive edilmiş beton numunelerin laboratuvar (kontrol) ortamında ve %5 sülfürik aside maruz kaldığı ortamlardaki ağırlıklarında artma yada azalma gibi olan değişimleri gösterilmiştir. Ağırlıkta artmanında azalmanın da fazla olması betondaki bozulma miktarının fazla olduğu göstermektedir. Grafiği incelediğimizde, 90 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra 28 gün asite bırakılan 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.13 artmıştır. Benzer şekilde, 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen sonra 28 gün asite bırakılan 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.47 artmıştır. Ayrıca 88 gün laboratuvarında kürlen ve son iki gün ısı kürü uygulanan ve 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre % 0.73 artarken 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite

maruz bırakılmayanlara göre % 0.88 artmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 500 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül miktarına ve 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin ağırlığı, 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin ağırlığına göre biraz daha fazla artmıştır. 88C2O-28A (gecikmiş ısı kürü uygulanmış) ile 90C-28A (ısı kürü uygulanmamış) geopolimer numuneleri karşılaştırıldığında ise ısı kürü uygulandıktan sonra asite maruz bırakılan numunelerin ağırlığı ısı kürü uygulanmayanlara göre biraz daha fazla artmıştır. Fakat ağırlık değişimleri 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu küldeki numunelerdeki gibi her iki durumda da çok belirgin değildir. Numunedeki ağırlık artışı sülfürik asit emiliminden dolayı kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4 FA100-400 numunelerinin ağırlık değişimi sonuçları

Şekil 4.4' de uçucu kül miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan alkali aktive edilmiş beton numunelerin laboratuvar (kontrol) ortamında ve %5 sülfürik aside maruz kaldığı ortamlardaki ağırlıklarında artma yada azalma gibi olan değişimleri gösterilmiştir. Grafiği incelediğimizde, 90 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra 28 gün asite bırakılan 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre % 1.34 artmıştır. Benzer şekilde, 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen sonra 28 gün asite bırakılan 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı asite maruz bırakılmayanlara göre % 1.48 artmıştır. Ayrıca 88 gün laboratuvar ortamında bekletilen ve son iki gün ısı kürü uygulanan ve 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya



sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre %1.61 artarken 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü numunelerin ağırlığı sülfürik asite maruz bırakılmayanlara göre %1.19 artmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül miktarına ve 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin ağırlığı, 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcıya sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin ağırlığına göre biraz daha fazla artmıştır. 88C20-28A (gecikmiş ısı kürü uygulanmış) ile 90C-28A (ısı kürü uygulanmamış) geopolimer numuneleri karşılaştırıldığında ise ısı kürü uygulandıktan sonra asite maruz bırakılan numunelerin ağırlığı ısı kürü uygulanmayanlara göre biraz daha fazla artmıştır. FA100-400-0.55 numunelerinde ısı kürü uygulanmış numunelerde ağırlık artışından sonra bir miktar düşme gözlemlenmiştir. Bu asit emilimden sonra numunelerde ağırlık kaybı yaşandığını yani numunelerdeki parça dökülmesi ve yüzey erezyonundan dolayı numunelerin ağırlıklarında kayıp oluşmaktadır.

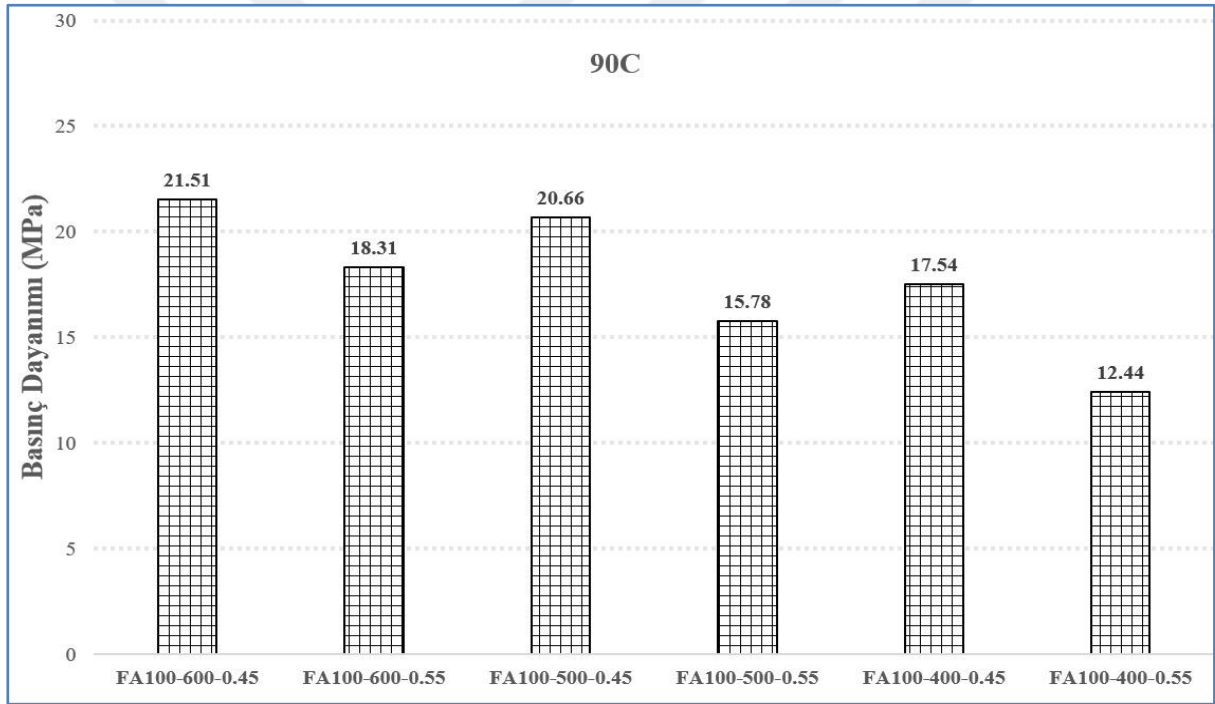
Geopolimer betonlardaki ağırlıkların sonuçlarını incelendiğinde, asite maruz kalan numunelerin ağırlıklarında artış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, geopolimer beton numunelerinde sülfürik asidin emilmesidir. Ayrıca sülfürik aside maruz kalan numuneler başta asit emilimi nedeniyle beton numunelerin ağırlıklarında şişme, ardından bu şişme beton numunelerin karşılaşılabileceği çekme gerilimini aştığı için beton numunelerinde çatlama ve dökülme görülmektedir. Bu aşama özellikle sülfürik asite daha fazla maruz kalma durumunda (90 gün gibi) görülmektedir.

### **4.3. Numunelerin Basınç Dayanımları**

90 gün labarotuar ortamında bekletilen uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemet değerleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan geopolimer betonların basınç mukavemeti 21.51 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 18.31 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül olan ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 20.66 MPa olurken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 15.78 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül olan ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 seçilen uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 17.54 MPa iken; alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 12.44 MPa elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek basınç dayanım sonucu 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu

kül içeren ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda gözlenirken, en düşük basınç dayanımı ise  $400 \text{ kg/m}^3$  uçucu kül içeren ve ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonlarda görülmüştür.

Sonuçları kontrol ettiğimizde, laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte beton numunelerin basınç dayanımı sonuçlarının arttığı gözlemlenmektedir. 90 günün sonunda en düşük basınç dayanımı FA100-400-0.55 beton numunelerinde (12.44 MPa), en yüksek basınç dayanımı ise FA100-600-0.45 beton numunelerinde (21.51MPa) bulunmuştur. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemeti alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.55 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerinin basınç mukavemetine göre daha fazladır.

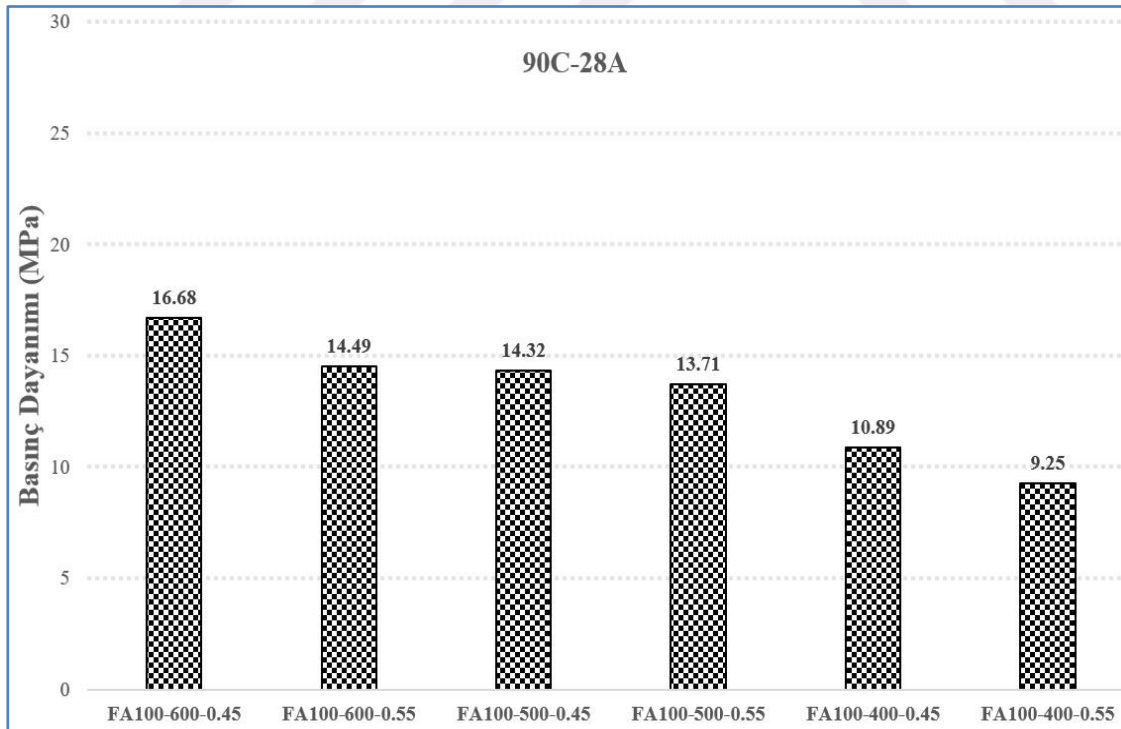


Şekil 4. 5 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.6'da %100 uçucu kül içeren ve 90 gün laboratuvar kürüne maruz kaldıktan sonra 28 gün asit ortamında bekletilen uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti incelenmiştir. Bağlayıcı olarak  $600 \text{ kg/m}^3$  uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 16.68 MPa olurken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 14.49 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  uçucu kül ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton

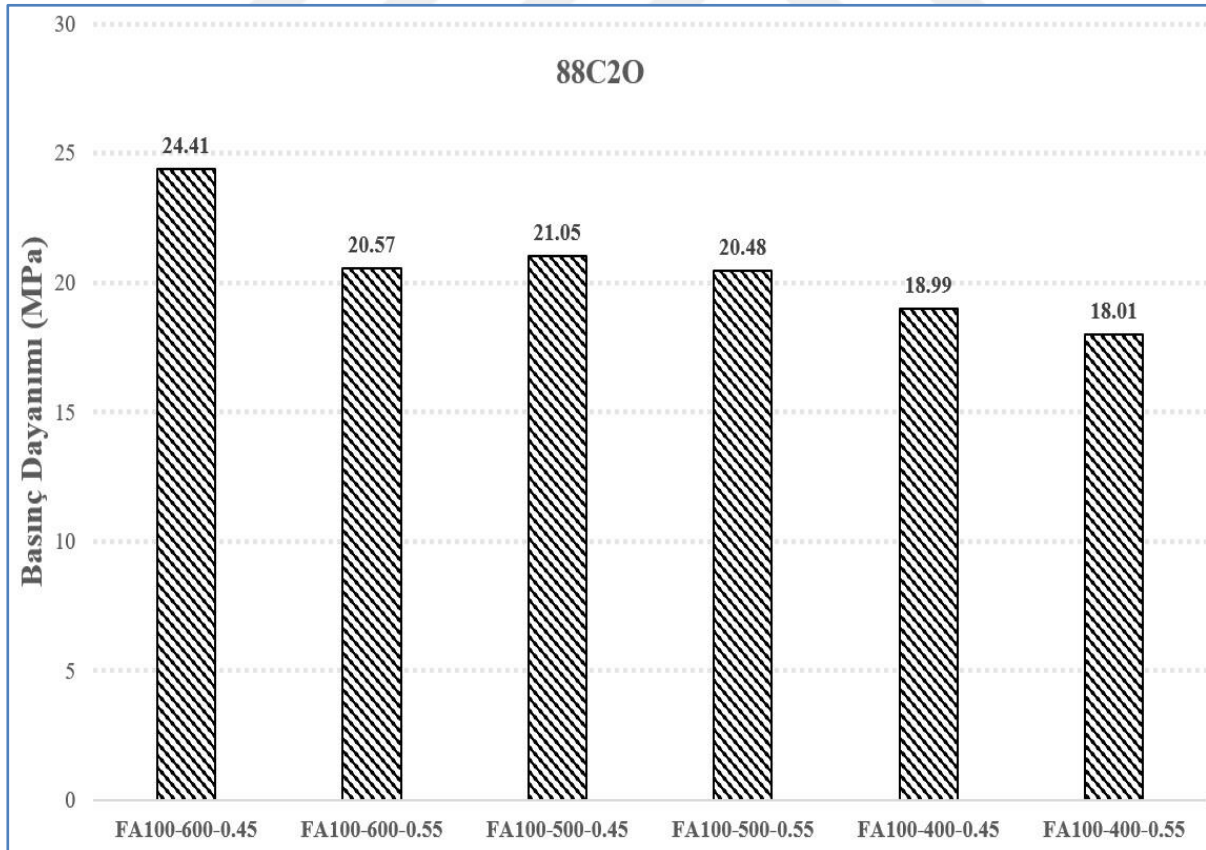
numunelerin basınç mukavemeti 14.32 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 13.71 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 10.89 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 9.25 MPa bulunmuştur. Sonuçlar kontrol edildiğinde, en yüksek basınç dayanımı bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda gözlenirken, en düşük basınç dayanımı ise 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan uçucu küllü geopolimer betonlarda görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 5% sülfürik asit etkisine maruz kalan beton numunelerin uçucu kül miktarı artmasıyla birlikte numunelerin basınç dayanımı sonuçlarının arttığı gözlemlenmektedir. Asit sonrası en düşük basınç dayanımı FA100-400-0.55 beton numunelerinde (9.25 MPa), en yüksek basınç dayanımı ise FA100-600-0.45 beton numunelerinde (16.68 MPa) bulunmuştur. Alkali aktivatör /bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerinin artık basınç mukavemeti alkali aktivatör /bağlayıcı oranı 0.55 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerinin artık basınç mukavemetinden daha fazladır.



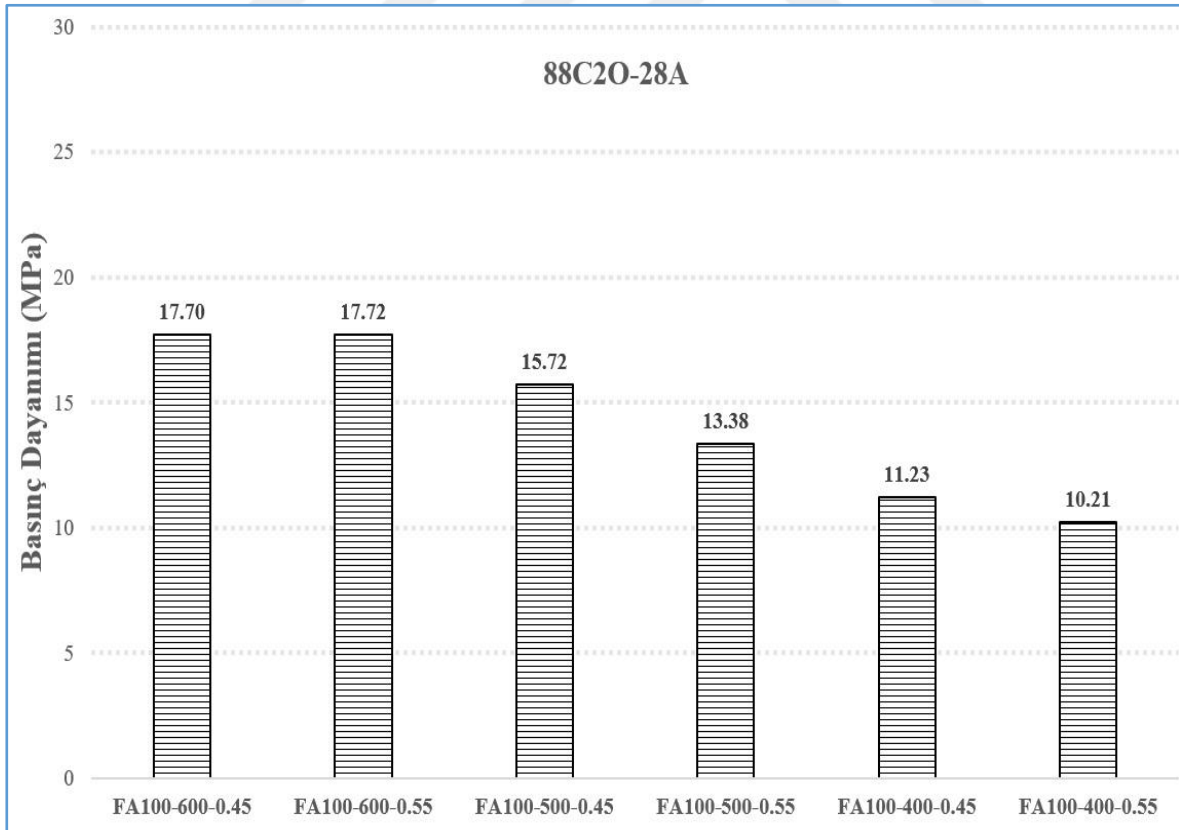
Şekil 4.6 90C-28A numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.7’de %100 uçucu kül içeren ve 88 gün kontrol ortamında + 48 saat 70°C fırında bekletilen uçucu küllü geopolimer betonların dayanımları sonuçları incelenmiştir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 24.41 MPa olurken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 20.57 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 21.05 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 20.48 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 18.99 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 18.01 MPa bulunmuştur. Sonuçlar kontrol edildiğinde, en yüksek basınç dayanımı bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda gözlenirken, en düşük basınç dayanım ise 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan uçucu küllü geopolimer betonlarda görülmüştür.



Şekil 4.7 88C20 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.8’de %100 uçucu kül içeren ve 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenmiş uçucu küllü geopolimer beton numunelerin 28 günlük 5% sülfürik asit ortamındaki basınç dayanımları incelenmiştir. Bağlayıcı olarak 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 17.70 MPa olurken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 17.72 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 15.72 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 13.38 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 11.23 MPa iken; 0.55 alkali solüsyon/ bağlayıcı oranına sahip uçucu küllü geopolimer beton numunelerin basınç mukavemeti 10.21 MPa bulunmuştur. Sonuçlar kontrol edildiğinde, en yüksek basınç dayanımı bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 ve 0.55 olan betonlarda gözlenirken, en düşük basınç dayanım ise 400 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül içeren ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan uçucu küllü geopolimer betonlarda görülmüştür.



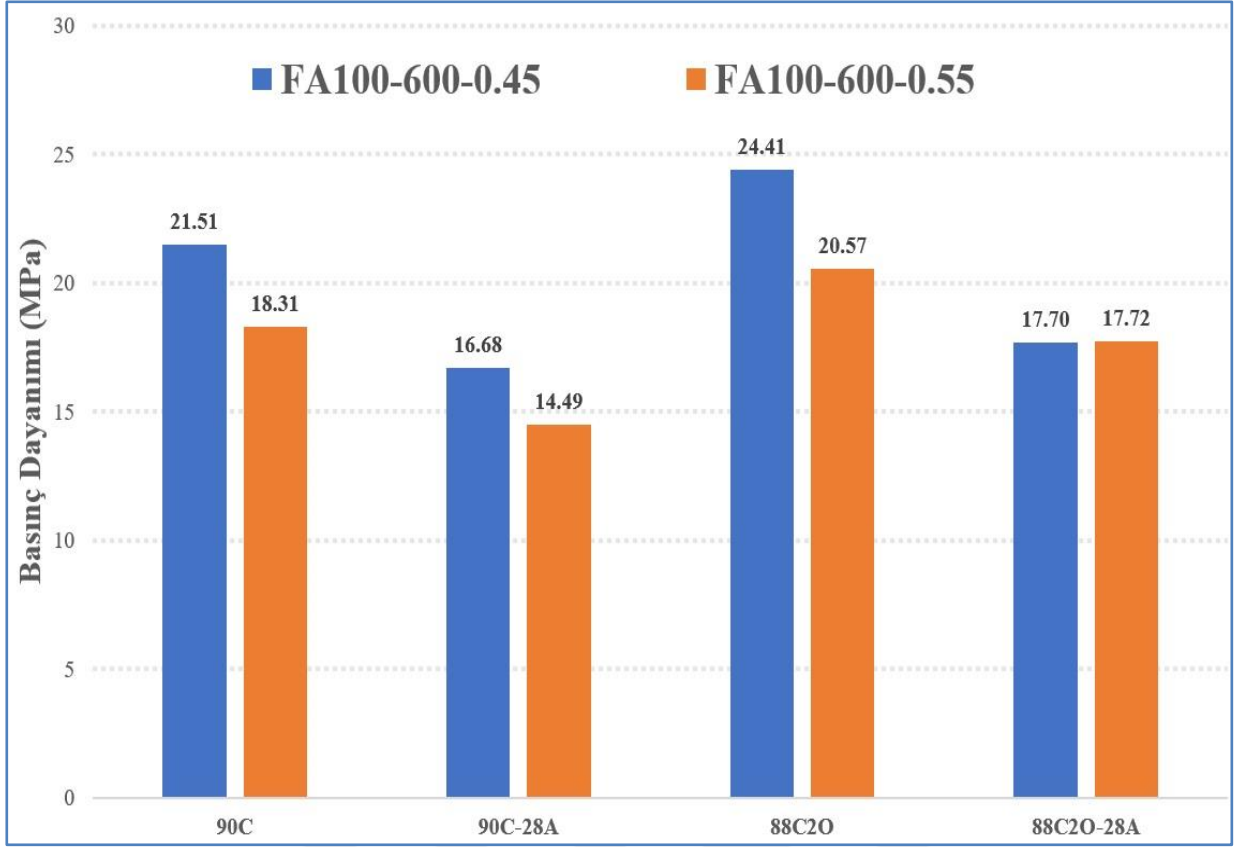
Şekil 4.8 88C20-28A numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.9’da  $600 \text{ kg/m}^3$  uçucu kül içeren alkali aktive edilmiş beton numunelerin 90. günde laboratuvar ortamında (90C), 90 gün laboratuvar kürüne maruz kaldıktan sonra 28 gün %5 sülfürik asit içeren ortamlarda (90C-28A) , 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat  $70^\circ\text{C}$  fırın ortamında (88C2O) ve 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat  $70^\circ\text{C}$  fırında kürlendikten sonra 28 gün %5 sülfürik asit etkisine maruz kalan ortamlardaki (88C2O -28A ) basınç dayanım değerlerini MPa olarak göstermektedir. 90 gün laboratuvar ortamında tutulan ve alkali /bağlayıcı oranı 0.45 olan alkali aktive edilmiş betonların basınç dayanımı 21.51 MPa olurken, alkali solüsyon/ bağlayıcı oranının miktarı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 18.31 MPa olmuştur.

90 gün laboratuvar kürüne maruz kaldıktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asitte tutulan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör /bağlayıcı oranı 0.45 olan beton numunelerinin basınç mukavemeti 16.68 MPa olurken, 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip betonların basınç mukavemeti ise 14.49 MPa olmuştur. 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat  $70^\circ\text{C}$  fırında kürlenen alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda basınç dayanımı 24.41 MPa olurken, alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 20.57 MPa bulunmuştur.

88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat  $70^\circ\text{C}$  fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda basınç dayanımı 17.70 MPa olurken, alkali solüsyon/ bağlayıcı oranı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 17.72 MPa bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde,  $600 \text{ kg/m}^3$  uçucu kül miktarına sahip geopolimer betonlarda en büyük basınç dayanımı 88C2O (ısı kürü uygulanmış) ortamında elde edilirken, en düşük basınç dayanım ise 90C-28A (ısı kürü uygulanmadan asite maruz kalmış) ortamında elde edilmiştir. Alkali solüsyon/bağlayıcı oranı olarak ise 0.45, 0.55’den daha iyi dayanım ve durabilite performansı göstermiştir.



Şekil 4.9. FA100-600 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.10'da uçucu kül miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan alkali aktive edilmiş beton numunelerin 90 gün boyunca laboratuvar ortamında (90C), 90 gün laboratuvar ortamında kaldıktan sonra 28 gün %5 sülfürik asit içeren ortamlarda (90C-28A), 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırın ortamında (88C2O) ve 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan ortamlardaki (88C2O-28A) basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 90 gün laboratuvar ortamında tutulan betonlardan alkali /bağlayıcı oranı 0.45 olan uçucu küllü geopolimer betonların basınç mukavemeti 20.66 MPa olurken, 0.55 alkali aktivatör/ bağlayıcı oranına sahip AAE beton numunelerinin basınç dayanımı ise 15.78 MPa olmuştur.

90 gün laboratuvar kürüne maruz kaldıktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asitte tutulan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda basınç dayanımı 14.32 MPa olurken, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 13.71 MPa olmuştur. 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenen alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45



olan beton numunelerinin basınç mukavemeti 21.05 MPa olurken, 0.55 alkali aktivatör/bağlayıcı oranı sahip beton numunelerinin basınç mukavemeti ise 20.48 MPa bulunmuştur.

88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda basınç dayanımı 15.72 MPa olurken, alkali solüsyon/ bağlayıcı oranının 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 13.38 MPa bulunmuştur.



Şekil 4.10 FA100-500 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

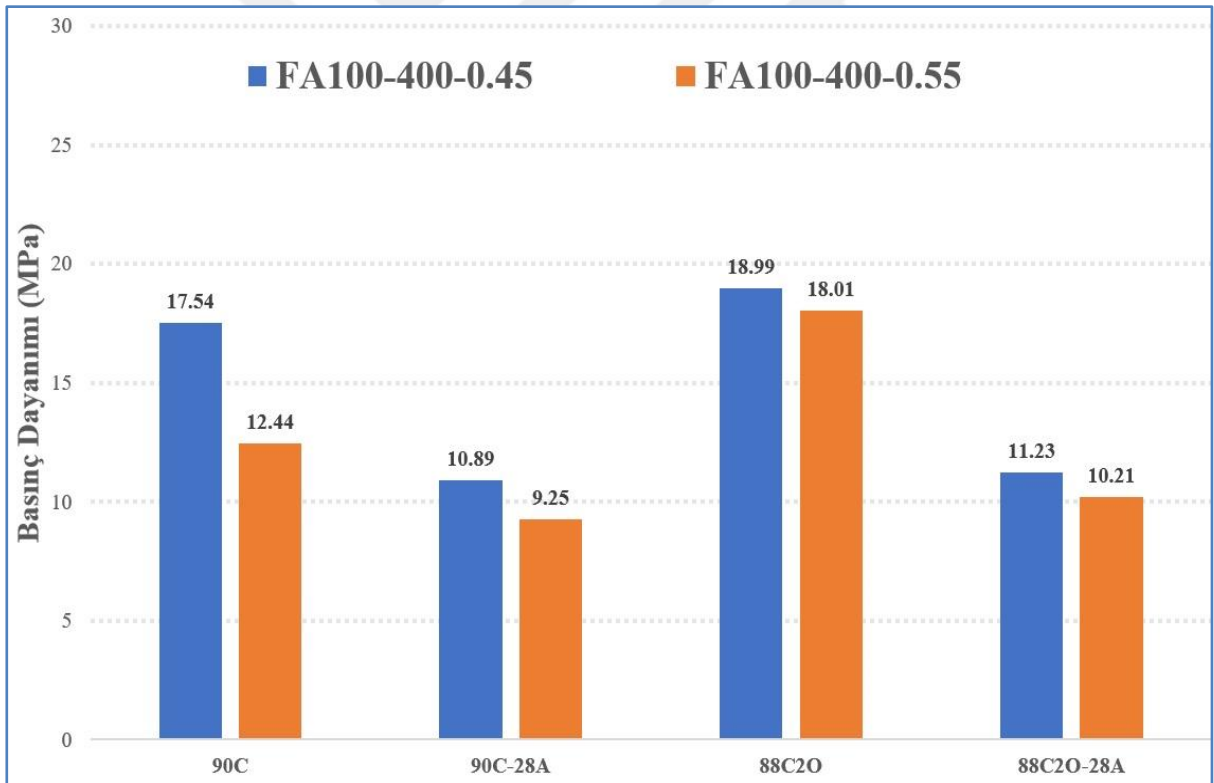
Şekil 4.11’de uçucu kül miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan alkali aktive edilmiş beton numunelerin 90 gün boyunca laboratuvar ortamında (90C), 90 gün laboratuvar ortamında kaldıktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asit içeren ortamlarda (90C-28A) , 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırın ortamında (88C20) ve 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan ortamlardaki (88C20 -28A ) basınç dayanım değerleri göstermektedir. 90 gün laboratuvar ortamında tutulan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonların basınç



dayanımı 17.54 MPa olurken, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 12.44 MPa olmuştur

90 gün laboratuvar kürüne maruz kaldıktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asitte tutulan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan beton numunelerinin basınç mukavemeti 10.89 MPa olurken, 0.55 alkali aktivatör/ bağlayıcı oranına sahip beton numunelerinin basınç mukavemeti ise 9.25 MPa olmuştur. 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenen alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda basınç dayanımı 18.99 MPa olurken, alkali aktivatör/ bağlayıcı oranı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 18.01 MPa bulunmuştur

88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan alkali aktive edilmiş beton numunelerden alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan betonlarda basınç dayanımı 11.23 MPa olurken, alkali aktivatör/ bağlayıcı oranı 0.55 olan betonların basınç dayanımı ise 10.21 MPa bulunmuştur.



Şekil 4.11 FA100-400 numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.12’de uçucu kül oranı %100 olan FA100 ve alkali /bağlayıcı oranı sadece 0.45 olan uçucu küllü geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. 90 gün boyunca laboratuvar ortamındaki geopolimer beton numunelerde, bağlayıcı miktarı 600

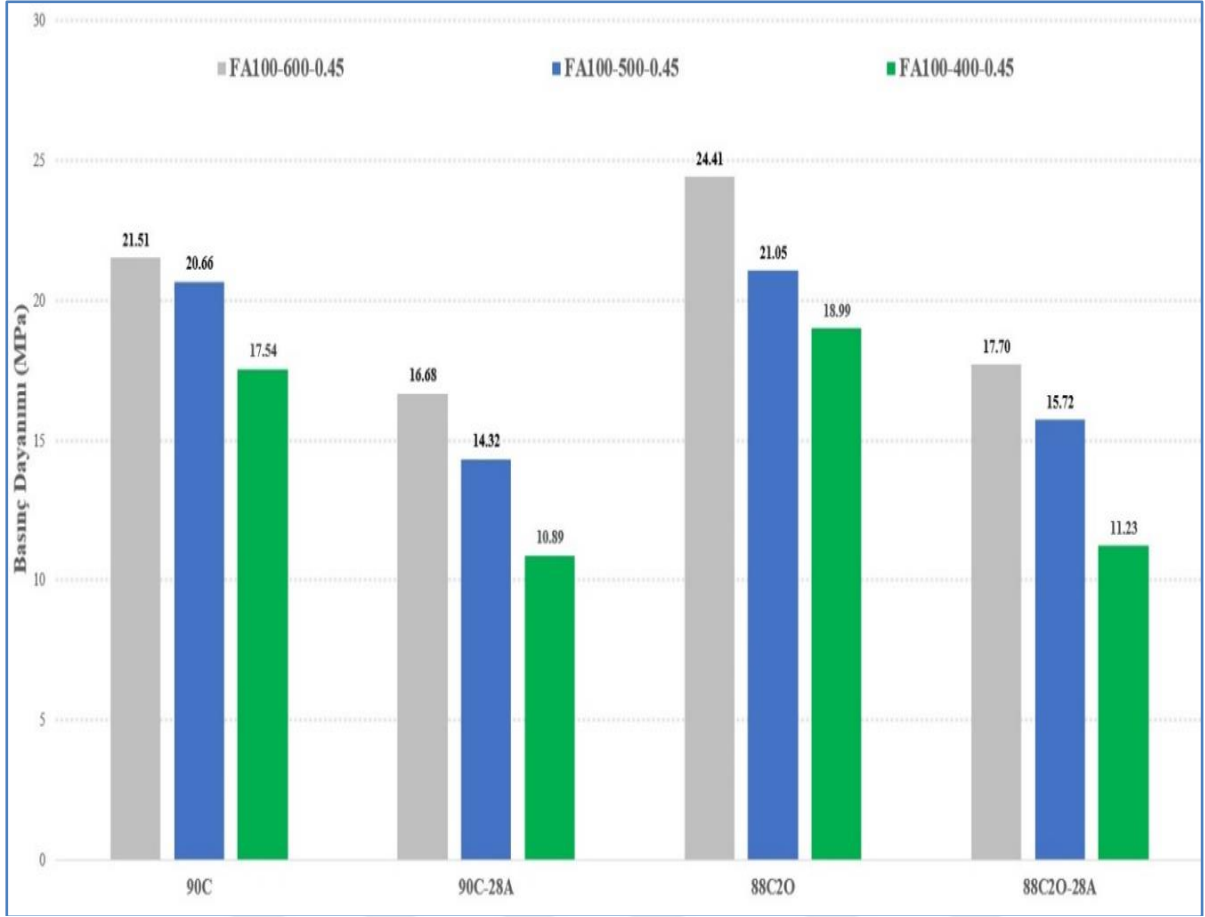
kg/m<sup>3</sup> FA100 numunelerinin basınç dayanımı 21.51 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 20.66 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 17.54 MPa bulunmuştur.

90 gün laboratuvar ortamında tutulduktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılan alkali aktive edilmiş numunelerde 600 kg/m<sup>3</sup> bağlayıcılı FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 16.68 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 14.32 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 10.89 MPa bulunmuştur.

88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenmiş alkali aktive edilmiş beton numunelerde bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 24.41 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 21.05 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> FA100 olan beton numunelerinin basınç dayanımı ise 18.99 MPa bulunmuştur.

88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan alkali aktive edilmiş beton numunelerde bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 17.70 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 15.72 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 11.23 MPa bulunmuştur.

Alkali /bağlayıcı oranı 0.45 olan alkali aktive edilmiş betonlarda en yüksek basınç dayanımına 88 gün laboratuvar + 48 saat 70°C fırında bekletilen ve bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerde elde edilirken, en düşük basınç dayanımına 90 gün laboratuvar ortamında tutulduktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılan ve bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerde görülmüştür.



**Şekil 4.12** Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan beton numunelerinin basınç dayanımları

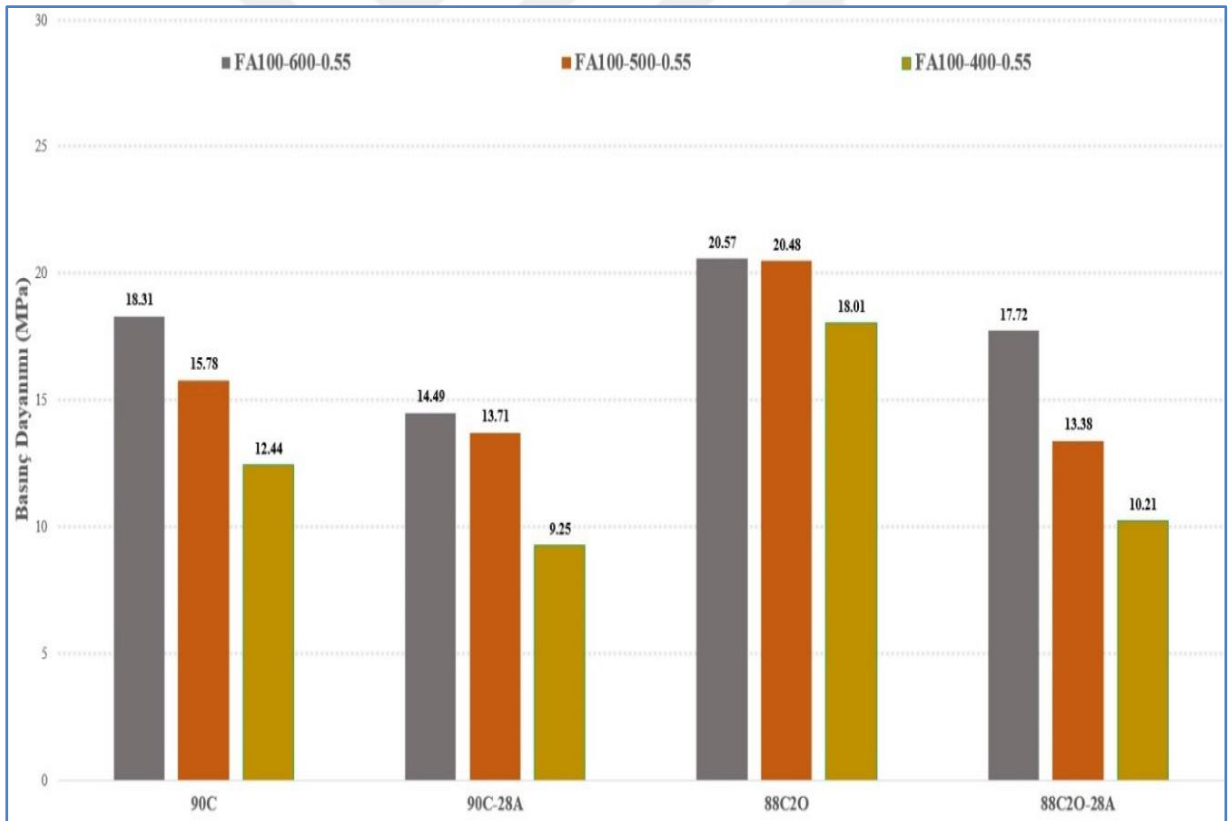
Şekil 4.13'te %100 uçucu kül ile üretilen ve alkali /bağlayıcı oranı 0.55 olan FA100 geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Laboratuvar ortamında 90 gün bekletilen alkali aktive edilmiş beton numunelerde bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 18.31 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 15.78 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 12.44 MPa bulunmuştur.

90 gün laboratuvar ortamında tutulduktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılan alkali aktive edilmiş beton numunelerde bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 14.49 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 13.71 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 9.25 MPa bulunmuştur. 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenmiş alkali aktive edilmiş beton numunelerde bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 20.57 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 20.48 MPa, bağlayıcı

miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı ise 18.01 MPa elde edilmiştir.

88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlendikten sonra 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan alkali aktive edilmiş beton numunelerde bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 17.72 MPa, bağlayıcı miktarı 500 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 13.38 MPa, bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerinin basınç dayanımı 10.21 MPa bulunmuştur.

Alkali aktivatör /bağlayıcı oranı 0.55 olan alkali aktive edilmiş beton numunelerde en yüksek basınç dayanıma 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenen ve bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 beton numunelerde elde edilirken, en düşük basınç dayanımına 90 gün laboratuvar ortamında tutulduktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılan ve bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> olan FA100 alkali aktive edilmiş beton numunelerde bulunmuştur.



Şekil 4.13 Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.55 olan beton numunelerinin basınç dayanımları

Şekil 4.14'de geopolimer beton numunelerinin basınç dayanım değerleri farklı ortamlarda gösterilmiştir. Sonuçları incelediğimizde, maksimum basınç dayanıma 88 gün

laboratuvar + 48 saat 70°C fırında bekletilen bağlayıcı miktarı 600 kg/m<sup>3</sup> ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olan alkali aktive edilmiş beton numunelerde 24.41 MPa bulunmuştur. Minimum basınç dayanımı ise 90 gün laboratuvar ortamında tutulduktan sonra 28 gün % 5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılan bağlayıcı miktarı 400 kg/m<sup>3</sup> ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.55 olan alkali aktive edilmiş beton numunelerde 9.25 MPa elde edilmiştir.



**Şekil 4.14** Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 ve 0.55 olan numunelerinin basınç dayanımları

## SONUÇLAR

Yapılan tez kapsamında farklı bağlayıcı miktarları ve alkali solüsyon/bağlayıcı oranları ile üretilen geopolimer betonların dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda 3 farklı uçucu kül miktarı ( $400 \text{ kg/m}^3$ ,  $500 \text{ kg/m}^3$  ve  $600 \text{ kg/m}^3$ ) ve iki farklı alkali solüsyon/bağlayıcı oranı (0.45 ve 0.55) kullanılarak hem bağlayıcı miktarının hem de alkali solüsyon/bağlayıcı oranının %5 sülfürik asit etkisinde geopolimer betonların dayanım ve durabilite performansı araştırılmıştır. Ayrıca bu üretilen geopolimer betonlara gecikmiş ısı kürü de uygulanarak gecikmiş ısı kürünün beton özelliklerine olan etkisi detaylıca incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Görsel inceleme sonuçlarına göre, % 5 sülfürik asite tabii tutulan betonların yüzeylerinde alçıtaşı oluşumu sebebiyle bozulmalar ve beyaz lekeler oluşmuştur. Oluşan bu alçıtaşı ürünleri betonun dış yüzeylerini yumuşattığı için önce pul pul dökülmeye ve ardından basınç dayanımının azalmasına neden olur. Yüzeyde beyaz lekeler ve çatlakların artması, bozulmanın daha fazla olduğunu göstermektedir. Sonuçlara göre, en az yüzeydeki bozulma  $600 \text{ kg/m}^3$  uçucu küllü geopolimer betonda oluşurken, en fazla bozulma ise  $400 \text{ kg/m}^3$  uçucu küle sahip geopolimer betonda meydana gelmiştir. 0.45 ve 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı oranı incelendiğinde ise neredeyse birbirine benzer bozulma gözükmemektedir. Isı kürü uygulanan numune yüzeylerinde ise çatlaklar oluşmuştur.
- Ağırlık değişimi sonuçlarına göre asite maruz kalan beton numunelerin ağırlıklarında asit Emilimi sonucu artış olduğu görülmüştür. Asit Emiliminin fazla olması numunelerdeki bozulmanın fazla olduğunu göstermektedir. Buna göre en fazla ağırlık değişimi  $400 \text{ kg/m}^3$  uçucu küllü geopolimer numunelerde elde edilirken en az ağırlık değişimi ise  $600 \text{ kg/m}^3$  uçucu küllü geopolimer numunelerde elde edilmiştir. Sülfürik asit etkisi sonucu, alkali solüsyon/bağlayıcı oranı 0.55 olan geopolimer numunelerin ağırlığı 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcı oranına sahip geopolimer beton numunelerin ağırlığından daha fazla artmıştır. Isı kürü uygulanmış numunelerin ağırlığı ısı kürü uygulanmamış numuneler ile karşılaştırıldığında ısı kürü uygulanan numunelerin ağırlığı asit etkisinden dolayı daha fazla artmıştır.
- Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ise, gecikmiş ısı kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı ısı kürü uygulanmamış numunelerin basınç

dayanımından daha yüksektir. Burada elde ettiğimiz sonuç 90 gün sonrasında bile uçucu küllü geopolimer betonlarda geopolimerizasyon sürecinin devam ettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca gecikmiş ısı kürü uygulaması da geopolimer betonların dayanım kazanması için önem arz etmektedir.

- Geleneksel Portland çimentolu betona benzer şekilde, bağlayıcı miktarının artmasıyla geopolimer numunelerin basınç dayanımı artmıştır. En yüksek dayanım  $600 \text{ kg/m}^3$  içeren uçucu küllü geopolimer betonlarda gözlemlenirken, en düşük dayanım ise  $400 \text{ kg/m}^3$  içeren uçucu küllü geopolimer betonlarda gözlemlenmiştir. Ayrıca 0.45 alkali solüsyon/bağlayıcı oranına sahip geopolimer numuneler 0.55 alkali solüsyon/bağlayıcı oranına sahip geopolimer betonlardan daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Üretilen geopolimer numuneler içerisinde en yüksek basınç dayanımı hem 90C (laboratuvar) hem de 88C2O (ısı kürü uygulanmış) ortamında FA100-600-0.45 numunelerinde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise FA100-400-0.55 numunelerinde elde edilmiştir.
- 28 gün % 5 sülfürik asit etkisine maruz kalan beton numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına göre, 90 gün laboratuvar ortamında bekletilen (ısı kürü uygulanmayan ) beton numunelerin basınç dayanımı, 88 gün laboratuvar ortamında + 48 saat 70°C fırında kürlenen ve daha sonra asite maruz bırakılan geopolimer beton numunelerin basınç dayanımından daha az bulunmuştur. Bu düşük dayanımın sebebi ise, uçucu küllü beton numunelerin ısı kürü olmadan basınç dayanım gelişiminin çok yavaş olması ve geopolimerizasyon reaksiyonlarının tamamlanmamasından ötürü numunelerin iç yapısındaki porozitenin artması gösterilebilir.
- Sülfürik asit etkisi sonrası da artık basınç dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında, en düşük basınç dayanımı FA100-400-0.55 beton numunelerinde, en yüksek basınç dayanımı ise FA100-600-0.45 beton numunelerinde bulunmuştur. Sonuçlar uygun geopolimer karışımları üretildiğinde geopolimer beton basınç dayanımlarındaki değişimin OPC beton basınç dayanıma benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Uçucu küllü geopolimer betonlar özellikle çok yüksek basınç dayanım değeri gerekmeyen yarı-yapı elemanların inşasında ya da prekast sektöründe yapı elemanların inşasında kullanılabilir.

## KAYNAKÇA

- Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., & Abu-Tair, A. I. (2003). The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 123–144.
- Al-Tayyib, A.-H. J., & Al-Zahrani, M. M. (1990). Use of polypropylene fibers to enhance deterioration resistance of concrete surface skin subjected to cyclic wet/dry seawater exposure. *Materials Journal*, 87(4), 363–370.
- Álvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., ... Vázquez, E. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 175–183.
- Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Tahir, M. M., & Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 80–86.
- Baker, M. (1984). Evaluation on the utilization options, combustion by products utilization manual. *EPRI Report No. CS-3122*.
- Baščarević, Z. (2015). The resistance of alkali-activated cement-based binders to chemical attack. In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes* (pp. 373–396). Elsevier.
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., & Provis, J. L. (2012). Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3), 138–151.
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., & Ramezani pour, A. A. (2011). Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 251–260.
- C618, A. (2012). *International. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. American Society for Testing and Materials West Conshohocken.
- Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 67, 14–19.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224–229.
- Crumpton, C. F., Smith, B. J., & Jayaprakash, G. P. (1989). Salt weathering of limestone aggregate and concrete without freeze-thaw. *Transportation Research Record*, (1250).
- Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*, 6(2), 263–278.



- Davidovits, J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly (sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. *Proceedings of the World Congress Geopolymer*, 28, 9–15. Saint Quentin, France.
- Davidovits, J., Comrie, D. C., Paterson, J. H., & Ritcey, D. J. (1990). Geopolymeric concretes for environmental protection. *Concrete International*, 12(7), 30–40.
- Diaz, E. I., & Allouche, E. N. (2010). Recycling of fly ash into geopolymer concrete: creation of a database. *2010 IEEE Green Technologies Conference*, 1–7. IEEE.
- Douglas, E., Bilodeau, A., Brandstetr, J., & Malhotra, V. M. (1991). Alkali activated ground granulated blast-furnace slag concrete: preliminary investigation. *Cement and Concrete Research*, 21(1), 101–108.
- Douglas, E., & Zerbino, R. (1986). Characterization of granulated and pelletized blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 16(5), 662–670.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
- Escalante, E., & Ito, S. (1990). Measuring the rate of corrosion of steel in concrete. In *Corrosion rates of steel in concrete*. ASTM International.
- Fang, Y., & Kayali, O. (2013). The fate of water in fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 39, 89–94.
- Fernández-Jiménez, A., Garcia-Lodeiro, I., & Palomo, A. (2007). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3055–3065.
- Gilbert, R. I. (2002). Creep and shrinkage models for high strength concrete—proposals for inclusion in AS3600. *Australian Journal of Structural Engineering*, 4(2), 95–106.
- Guerrieri, M., & Sanjayan, J. G. (2010). Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire and Materials: An International Journal*, 34(4), 163–175.
- Güneyisi, E. (2004). *Mechanical and durability performance of plain and blended cement concrete exposed to chlorides and different curing regimes*. PhD thesis, Bogazici University, Istanbul, Turkey.
- Halstead, W. J. (1986). Use of fly ash in concrete. *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, (127).
- Hardjito, D., Cheak, C. C., & Ing, C. H. L. (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar. *Modern Applied Science*, 2(4), 3–11.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*.

- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467–472.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. J. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46(3), 361–373.
- Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H.-K. (2014). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 50, 169–176.
- Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 334–339.
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1583–1589.
- Krivenko, P. (2003). *Alkali-activated cements and concretes*.
- Lee, A. R. (1974). Blastfurnace and steel slag. Production properties and uses. *Edward Arnold Ltd. London*. 3. 80 Pounds, 128.
- Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Chemical interactions between siliceous aggregates and low-Ca alkali-activated cements. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 844–855.
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 1493–1504. UWM Center for By-Products Utilization.
- Malagavelli, V., & Rao, P. N. (2010). High performance concrete with GGBS and ROBO sand. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(10), 5107–5113.
- Malhotra, V. M. (2002). Introduction: sustainable development and concrete technology. *Concrete International*, 24(7).
- Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). Advances in concrete technology, vol. 1. *Pozzolanic and Cementitious Materials*, 1st Edn. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2012). Effect of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH Ratios and NaOH Molarities on Compressive Strength of Fly-Ash-Based Geopolymer. *ACI Materials Journal*, 109(5).
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2013). Properties of fly ash geopolymer concrete in seawater environment. *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2013*.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... Dasgupta,

- P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc.
- Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J., & De Magalhaes, A. G. (2014). *Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies*. woodhead Publishing.
- 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(7), 1305–1314.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., & Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301(1–3), 246–254.
- Patankar, S. V, Ghugal, Y. M., & Jamkar, S. S. (2014). Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar. *Indian Journal of Materials Science*, 2014.
- Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 110–125.
- Rangan, B. V., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Sumajouw, D. M. J. (2005). Studies on fly ash-based geopolymer concrete. *Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France*, 28, 133–137.
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183.
- Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29(2), 249–254.
- Rukzon, S., & Chindapras, P. (2014). Strength and porosity of bagasse ash-based geopolymer mortar. *Journal of Applied Sciences*, 14(6), 586–591.
- Sengul, O., Tasdemir, C., & Tasdemir, M. A. (2005). Mechanical properties and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash. *ACI Materials Journal*, 102(6), 414.
- Shen, S.-L., Wang, Z.-F., Sun, W.-J., Wang, L.-B., & Horpibulsuk, S. (2013). A field trial of horizontal jet grouting using the composite-pipe method in the soft deposits of Shanghai. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 142–151.
- Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary cementitious materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74(1), 211–278.
- Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (2007). Engineering properties

- of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 37(2), 251–257.
- Song, X. J., Marosszeky, M., Brungs, M., & Chang, Z.-T. (2005). Response of geopolymer concrete to sulphuric acid attack. *Proceedings of World Congress Geopolymer*, 157–160.
- Stanton, T. E. (1942). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107(1), 54–84.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1), 36–40.
- Wallah, S., & Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties*.
- Wang, H., Li, H., & Yan, F. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268(1–3), 1–6.
- Wang, K., Shah, S. P., & Mishulovich, A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 299–309.
- Wang, S.-D., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1033–1043.
- Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Ismail, K. N., Razak, R. A., & Sandu, A. V. (2015). Effect of solids-to-liquids, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-to-NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si+ Ca) geopolymerisation system. *Materials*, 8(5), 2227–2242.
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 43(2), 218–223.