

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

**FARKLI GEOPOLİMER BETONLARIN DAYANIMLARININ**  
**ZAMANLA DEĞİŞİMİ VE DURABİLİTESİ**

**İSMAİL ERHAN KALAYCIKLİ**

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

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

**İSTANBUL, 2020**

İsmail Erhan KALAYCIKLI tarafından hazırlanan “Farklı Geopolimer Betonların Dayanımlarının Zamanla Değişimi ve Durabilitesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

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

.....

**Başkan :** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

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

.....

**Üye :** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

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

.....

Tez Teslim Tarihi: ...../...../.....

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

.....

Dr.Öğr.Üyesi Ümit ALKAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün Tez Yazım Kuralları esas alınarak tarafımda hazırlanan ilgili tez çalışması içerisinde;

- Tezin içerisinde vermiş olduğum verileri, dökümanları ve bilgileri etik ve akademik kuralları gözeterek hazırladığımı,
  - Bütün belgeleri, bilgileri, değerlendirmeleri ve sonuçlarını bilimsel etik ve ahlak kuralları çerçevesinde hazırlayarak sunduğumu,
  - Tez çalışması içerisinde kullandığım eserlerin tümüne uygun atıflarda bulunarak kaynak beyan ettiğimi,
  - Kullanılan veriler içerisinde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tez içerisinde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirmekte olup, aksi bir durum olduğunda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabul ettiğimi beyan ederim.

İsmail Erhan KALAYCIKLI

...../...../2020

# FARKLI GEOPOLİMER BETONLARIN DAYANIMLARININ ZAMANLA DEĞİŞİMİ VE DURABİLİTESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İsmail Erhan KALAYCIKLİ

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2020

## ÖZET

Beton özelinde istenilen en önemli özellikler dayanım ve durabilitedir. Yapılarda kullanılan betonlarda bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu kullanılmaktadır. Betonda dayanım ve durabilitenin artırılması amacıyla beton içerisinde bağlayıcı malzeme olarak öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu, f-tipi uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkılı puzolanların kullanımı betonun durabilite performansını artırdığı bilinmektedir. Fakat Portland çimentosunun üretiminde çok yüksek miktarlarda CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir. Ayrıca çimento üretimi sırasında enerji maliyetleri de çok yüksektir. Bu sebeple, daha çevreci, yeni nesil, az enerji gerektiren betonların üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda atık puzolanik malzemelerle üretilen Geopolimer betonlar, Portland çimentosunun çevre ve enerji üzerinde yarattığı problemleri büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle yapılacak çalışmada Geopolimer betonların Portland çimentolu betonların yerine yapılarda kullanımı araştırılacaktır. Bu kapsamda, üç farklı Geopolimer beton incelenecektir. Bunlardan ilki, Geopolimer betonu içerisinde bağlayıcı malzeme olarak %95 yüksek fırın cürufu ve %5 silis dumanı içeren betonlar (95C5SF), ikinci olarak Geopolimer betonu içerisinde %65 yüksek fırın cürufu, %30 uçucu kül ve %5 silis dumanı içeren betonlar (65C30U5SF), ve üçüncü olarak ise Geopolimer betonu içerisinde %15 yüksek fırın cürufu, %80 uçucu kül ve %5 silis dumanı içeren betonların (15C80U5SF) binalarda yapısal elemanlar olarak kullanımı incelenmiştir. Geopolimer betonların üretimi sırasında alkali aktivatörler içerisinde sodyum hidroksit ve sodyum bileşimleri kullanılmıştır. Geopolimer betonlarda kontrol ortamında ve % 5 sülfürik asit etkisi altında ağırlık, basınç dayanımı kaybı ve görsel denetim kriterleriyle farklı Geopolimer betonların mekanik ve durabilite performansı belirlenmiştir. Sonuç olarak, 95C5SF Geopolimer betonların en yüksek basınç dayanımına, 15C80U5SF Geopolimer betonlarının ise en düşük dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. % 5 sülfürik asit etkisine karşı en iyi durabilite performanslarını 95C5SF ve 65C30U5SF numuneleri gösterdiğinden, bu betonların binaların yapımında yapısal eleman olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Geopolimer, Asit, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Silis Dumanı

Sayfa Sayısı : 81

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

THE VARIATION OF COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY  
PERFORMANCE OF DIFFERENT GEOPOLYMER CONCRETE WITH TIME

(M.Sc. Thesis)

İsmail Erhan KALAYCIKLI

ISTANBUL GELISIM UNIVERITY

INSTITUTE OF SCIENCE

JANUARY 2020

ABSTRACT

The most important properties of concrete are strength and durability. Concretes used in buildings contain Portland cement as a binding material. It is known that in order to increase strength and durability of concrete, the use of mineral additives such as blast furnace slag, fly ash, silica fume as binder material in concrete increases the durability performance of concrete. However, very high amounts of CO<sub>2</sub> are emitted in the production of Portland cement. In addition, energy costs during cement production are very high. Therefore, there is a need for the production of more environmentally friendly, new generation, low energy concrete. Recently, Geopolymer concretes produced with waste pozzolanic materials eliminate the problems posed by Portland cement on environment and energy. For this reason, the use of Geopolymer concretes instead of Portland cement concretes will be investigated. In the scope of the study, three different Geopolymer concrete will be examined. First of all, Geopolymer concretes containing 95% blast furnace slag and 5% silica fume (95C5SF) as binding material in Geopolymer concrete, secondly Geopolymer concretes containing 65% blast furnace slag, 30% fly ash and 5% silica fume (65C30U5SF), and thirdly, Geopolymer concretes containing 15% blast furnace slag, 80% fly ash and 5% silica fume (15C80U5SF) were investigated as structural elements in buildings. During the production of geopolymer concretes, sodium silicate and sodium hydroxide composition were used as alkali activator. Mechanical and durability performance of different Geopolymer concretes were determined by visual inspection, weight loss and compressive strength loss criteria under control environment and 5% sulfuric acid environment. As a result, it was determined that 95C5SF Geopolymer concrete had the highest compressive strength and 15C80U5SF Geopolymer concrete had the lowest compressive strength. Since 95C5SF and 65C30U5SF Geopolymer concretes exhibit the best durability performance against 5% sulfuric acid effect, it is concluded that these concretes can be used as structural elements in the construction of buildings.

Key Words : Geopolymer, Acid, Blast Furnace Stag, Fly Ash, Silica Fume,

Page Number : 81

Supervisor : Asst.Prof.Dr. Anıl NİŞ

## TEŞEKKÜR

Yaşam içerisinde ve öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek her zaman yanımda olan babam Burhan Kalaycıklı, annem Seviye Kalaycıklı'ya ve arkadaşım Tarık Ziya Erenay'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve Yüksek lisans öğrenim hayatım içerisinde özellikle tezim ile ilgili çalışmalarım ve deneylerimde şahsıma olan desteğini ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Gelişim Üniversitesi'ne ve çalışanlarına, lisans öğrencilerine ve yine okulumuzdaki yüksek lisans arkadaşım olan Uğur Keklik arkadaşşıma teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Gelişim Üniversitesi Yapı Malzemeleri laboratuvarı içerisinde gerçekleştirdiğim tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde malzeme destekleri ile bizlere katkı sağlayan Akçansa firması ve değerli çalışanları Yasin Engin ve Emre Ortemiz'e teşekkürlerimi sunarım.

Süreç içerisinde şahsıma yaptıkları manevi destek için işyerim İstanbul Enerji AŞ ve çalışanlarına ayrıca Uğur Demirel'e teşekkürlerimi sunarım.

İsmail Erhan KALAYCIKLI

...../...../.....

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2 . GEOPOLİMER BETON.....	7
2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu .....	7
2.1.1. Beton İçerisinde Yüksek Fırın Cüruf Kullanılması .....	8
2.2. F-Tipi Uçucu Kül .....	8
2.2.1. Geopolimer Beton İçerisinde F-Tipi Uçucu Kül Kullanılması .....	11
2.3. Silis Dumanı.....	11
2.3.1. Betonda silis dumanı kullanımı .....	12
2.4. Alkali Solüsyonlar .....	12
2.5. Geopolimer Betonda Durabilite .....	14
2.5.1. Sülfürik Asit Durabilitesi.....	15
2.6. Geopolimer Betonun Özelliği.....	17
2.7. Geopolimer Beton Dayanım ve Durabilitesi .....	18
2.7.1. Betonda Büzülme.....	18
2.7.2. Alkali – Silika Tepkimesi.....	19
2.7.3. Sıcaklık etkisi .....	20
2.7.4. Islanma - Kuruma Çevrimleri.....	20
2.8. Geopolimer Betonlarda Dayanım ve Durabilite Parametreleri .....	21
2.8.1. Geopolimer betonda kullanılan su miktarı .....	21
2.8.2. Silisyum Dioksit / Sodyum Oksit oranı .....	22
2.8.3. Isı Kürü ve Süresi .....	22
2.8.4. Alkali Aktivatör Oranı .....	22
2.8.5. Sodyum hidroksit Molaritesi .....	23

3. DENEY METODU.....	27
3.1. Malzeme Özellikleri .....	27
3.1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek fırın cürufu.....	27
3.1.2. Silis Dumanı.....	28
3.1.3. F-Tipi Uçucu kül.....	30
3.1.4. Agregâ Özellikleri .....	31
3.1.5. Alkali Solüsyonlar .....	32
3.1.6. Süper Akışkanlaştırıcı.....	33
3.2. Deney Metodu.....	34
3.2.1 Deneyde Kullanılan Kalıplar .....	34
3.2.2. Alkali Solüsyon Hazırlığı.....	35
3.2.3. Beton Karışımı Yöntemi .....	36
3.2.4. Geopolimer numune üretimi.....	39
3.2.5. Sülfürik asit hazırlığı.....	41
3.2.6. Ağırlıkta Meydana Gelen Değişim .....	42
3.2.7 Basınç Dayanım Testleri .....	48
4. TARTIŞMA VE BULGULAR .....	49
4.1 Görsel İnceleme .....	49
4.2 Ağırlık Azalması.....	53
4.3 Basınç Dayanımı Değişimi.....	57
5.SONUÇLAR .....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	68



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1 Öğütülmüş Granüle Yüksek fırın cürufu kimyasal ve fiziksel özelliği .....	27
Çizelge 2 Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özelliği .....	29
Çizelge 3 Uçucu küle ait fiziksel özellikler ve kimyasal bileşenler .....	30
Çizelge 4 Agregada kimyasal ve fiziksel özelliği .....	31
Çizelge 5 Sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özelliği.....	32
Çizelge 6 Süper Akışkanlaştırıcı Özelliği .....	33
Çizelge 7. 95C5SF içeren Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler .....	37
Çizelge 8. 65C30U5SF içeren Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.	38
Çizelge 9. 15C80U5SF içeren Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler.	38

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1 Uçucu kül - alkali aktivasyonu [36] .....	13
Şekil 2 Deneyleerde kullanılan yüksek fırın cürufu .....	28
Şekil 3 Deneyleerde kullanılan silis dumanı .....	29
Şekil 4 Deneyleerde kullanılan uçucu kül.....	30
Şekil 5 Deneyleerde kullanılan agregalar.....	31
Şekil 6 14M sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması .....	33
Şekil 7 Deneyleerde kullanılan kimyasal katkı .....	34
Şekil 8 Deneyleerde kullanılan kalıplar ve uygulaması.....	35
Şekil 9 Alkali aktivatör hazırlanması ve uygulaması.....	36
Şekil 10 Geopolimer beton karışım süreci .....	37
Şekil 11 Beton karışımı ve dökümü .....	40
Şekil 12. Numunelerin %5 sülfirik asit çözeltisinde bekletilmesi, ağırlık ölçümleri ve basınç testlerinin yapımı.....	42
Şekil 13 Laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin yüzey fotoğrafları ve ağırlık değişimleri .....	45
Şekil 14 Numune görüntüleri, asit etkisinde bekletilen numuneler ve ağırlık değişimleri .	47
Şekil 15 Numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanım testleri .....	48
Şekil 16 Sülfirik asite maruz bırakılan numunelerdeki yüzeysel değişimin incelenmesi ..	52
Şekil 17 Laboratuvar ortamına bırakılan numunelerin ağırlık değişimi .....	54
Şekil 18 Asit ortamında bırakılan numunelerdeki ağırlık değişim .....	55
Şekil 19 Numunelerin farklı ortamlarda 56 günlük ağırlık değişimi .....	56
Şekil 20 Numunelerin farklı ortamlarda 120 günlük ağırlık değişimi .....	56
Şekil 21 Farklı ortamda bulunan numunelerin 56 günlük basınç dayanımları .....	57
Şekil 22 Farklı ortamda bulunan numunelerin 120 günlük basınç dayanımları .....	58
Şekil 23 Normal hava ortamında bulunan numunelerin basınç dayanımları .....	59
Şekil 24 Asit ortamında bulunan numunelerin basınç dayanımları .....	60

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile beraber aşağıda paylaşılmıştır.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	gram/santimetreküp
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	kilogram/metreküp
<b>kg</b>	kilogram
<b>mm</b>	Milimetre
<b>°C</b>	Santigrad
<b>mPa</b>	Megapaskal
<b>gr</b>	Gram
<b>Ca</b>	Kalsiyum
<b>CaO</b>	Kalsiyum Oksit
<b>Si</b>	Silisyum
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon Dioksit
<b>Cl</b>	Klor
<b>S</b>	Kükürt
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Potasyum Oksit
<b>NaOH</b>	Sodyum Hidroksit
<b>KOH</b>	Potasyum Hidroksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	Sodyum Silikat
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum Oksit
<b>Si-Al</b>	Silisyum-Alüminyum
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Kalsiyum Hidroksit
<b>SO<sub>3</sub></b>	Kükürt Trioksit
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Demir (II) Oksit
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Titanyumdioksit
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Sodyum Oksit
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Manganik oksit

<b>MgO</b>	Magnezyum Oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum Dioksit

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

<b>OPC</b>	Normal Portland Çimento
<b>GGBS</b>	Yüksek Fırın Cürufu
<b>FA</b>	Uçucu Kül
<b>SF</b>	Silis Dumanı



## 1. GİRİŞ

Beton; agrega (çakıl, kum, kırmataş vb.), bağlayıcı madde (çimento), su ile birlikte kimyasal ve mineral katkı maddelerinin karışımından meydana gelen kompozit bir yapı malzemesidir. Bu malzeme, plastik kıvamda olması sebebiyle istenilen şekilde imal edilebilir. Priz alması ile birlikte zamana bağlı dayanımı artarak gerekli olan taşıma gücünü sağlar ve günümüzde inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Artan nüfusla beraber önümüzdeki yıllarda kullanımı daha da artacaktır.

Beton içerisinde bağlayıcı malzeme olarak genellikle Normal Portland Çimentosu (OPC) kullanılır. 2015 yılında yaklaşık olarak 4 milyar ton çimento üretilmiş olup Türkiye’de özelinde bu rakam 75 milyon tondur. 1 ton Portland çimento üretimi yapılırken 0.8 ton karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu açığa çıkmaktadır. Bu kapsamda çimento üretimi sırasında Türkiye’de yılda yaklaşık olarak 60 milyon ton CO<sub>2</sub> gazı dışarıya salınır [1]. Önümüzdeki 10 yıl içinde çimento üretim miktarının %25 oranında artacağı düşünülmektedir. Ayrıca çimento üretimi sırasında çok fazla miktarda enerji kullanılmaktadır. Küresel ısınma günümüzde en önemli sorunlardan bir tanesidir ve dünyada salgılanan CO<sub>2</sub>’nin %7’si çimento üretimi sonucunda oluşmaktadır [2]. Günümüzde nüfusun her geçen gün artması serbest bırakılan CO<sub>2</sub> miktarının da artmasına sebep olmakta ve bu durum insanlar ve çevre için önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Yenilenebilir ve sürdürülebilir uygulamaların yapılarda da oluşturulması için OPC yerine yeşil, sürdürülebilir çevre ve küresel ekonomi için yeni bağlayıcı özellikte malzeme ve farklı beton türleri gerekliliği oluşmuştur. Çünkü çimento üretimi sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> gelecek nesillerimizin sağlığını tehdit etmektedir. Bu sebepten dolayı, yeni malzemeler ve karışım oranları denenerek, betonun dayanım ve durabilitesinin artırılması için deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda; OPC yerine beton bağlayıcı malzemesi olarak yüksek fırın cürufu (GGBS), uçucu kül (FA) ve silis dumanı (SF) gibi fabrika atık malzemeleri kullanılarak elde edilen geopolimer betonların, betonun hem dayanım hem de durabilite özelliklerinde olumlu etki yarattığı belirtilmiştir. Yeni çimentosuz beton olarak kullanılan geopolimer ve alkali aktif betonlarla ilgili araştırmalar ve deneyler yapılmaktadır [3].

Geopolimer betonlar üretimleri sırasında OPC'ye göre daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır ve yaklaşık olarak 6 kat daha düşük CO<sub>2</sub> açığa çıkarır. Bu sebepten dolayı geopolimer betonlar OPC'ye göre çevre dostu bir betondur ve kimyasal asite karşı direnci ve yangına dayanımı OPC beton direncinden daha üstündür [4], [5]. OPC ile üretilen betonlarda asit ortamına maruz kaldığında beton dayanımında azalma gerçekleşir ve içeriğindeki yüksek miktardaki CaO dolayı hızlı bir şekilde beton yapısı bozulur. Ancak uçucu kütle üretilen geopolimer betonlar, uçucu kül içerisindeki düşük CaO içeriği sayesinde asit ortamında dayanımı yüksektir ve OPC'ye göre daha az bozulma meydana gelir.

Alkali ile aktive edilmiş geopolimer betonlar, bağlayıcı malzeme olarak metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBS), düşük kalsiyum içerikli uçucu kül (FA), silis dumanı (SF) gibi malzemeler içerir ve geopolimerizasyon reaksiyonları için genellikle endüstriyel ürün olan alümina silikat, sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörler kullanılır. Betonun fiziksel, kimyasal özelliklerini ve dayanımını arttırmak için ve betonların ortam koşullarında (ısı kürsüz) dayanım kazanması için Geopolimer betonlarda genellikle öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılır [6].

Geopolimerlerin amorf mikro yapısı vardır. Alkali aktivatörleri ve kaynak materyalleri, küçük kimyasal bileşenlere dayanan geopolimerizasyonların sonuç ürünlerine yani dayanım ve durabilite gibi özelliklerine etki eder. Geopolimerizasyon işlemi genellikle sıcaklıkla artar ve hızlanır. Uçucu külün normal şartlarda yani oda sıcaklığında dayanımının artması, ısı kürü ile dayanım kazanan numunelere kıyasla çok daha yavaştır [7]. Bu sebepten ötürü sadece uçucu kütle üretilen Geopolimer betonlar ısı kürüne ihtiyaç duyarlar. Isı kürü istenmeyen ortamlarda ise Geopolimer betonlara uçucu kütle beraber öğütülmüş yüksek fırın cürufu ilave edilir ve böylece yüksek fırın cürufundaki yüksek CaO içeriğinden dolayı Geopolimer numuneler normal ortam koşullarında da mukavemet kazanırlar.

Yapı malzemelerinde taşıyıcı beton malzemesinde esas olarak istenilen dayanım ve durabilitedir. Yapılan çalışmalarda OPC'nin dayanım özelliğinin istenilen düzeyde olmasına karşın, sülfat ve asit saldırıları sonucunda şiddetli çevresel şartlara ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığında yeterli dayanıklılık göstermediği belirlenmiştir. Bu sebepten ötürü de ayrıca Geopolimer betonların yaygınlaşması gerekmektedir. Fakat Geopolimer betonlarda kimyasal dayanım çalışmaları çok azdır.

Davidovits ve arkadaşları, OPC bağlayıcılı betonlarda kimyasal ataklara karşı beton numunelerdeki ağırlık kaybını incelemiş ve OPC ile üretilen betonlarda ortalama %86 oranında ağırlık kaybının yaşandığını, geopolimer beton numunelerinde ise 4 haftalık süreyle hidroklorik asit ve sülfürik asit etkisine maruz bırakıldığında sırasıyla %7 ve %6 ağırlık kaybının yaşandığı belirtilmiştir [8].

Bakharev yaptığı çalışmasında, uçucu küllü Geopolimer betonların yaklaşık 150 gün boyunca %5 asit saldırısına maruz bırakmış, geopolimer numunelerin OPC ile üretilen betonlara kıyasladığında daha üstün performans sağladığını ifade etmiştir [9].

Rangan ve Wallah ise yaptıkları çalışmada geopolimer beton numuneleri ile OPC beton numunelerini karşılaştırmış, geopolimer betonların OPC betonlardan daha yüksek dayanım sağladığını ifade etmişlerdir [10].

OPC'nin çevreci ve sürdürülebilirliğe olumsuz etkileri sebebiyle geopolimer betonun ilerleyen zamanlarda kullanımının artacağı açıktır. OPC üretimi sonucunda, atmosfere yaklaşık %8 oranında CO<sub>2</sub> salınmaktadır. Idorn ve Roy'un çalışmalarında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu Geopolimer betonların sera gazı emisyonunu yaklaşık olarak %80 oranında azalttığını ifade etmişlerdir [11].

Duxcon ve diğer çalışmacılar ise uçucu küllü üretilen Geopolimer betonların sera gazı emisyonunu ortalama %85 oranında azalttığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda araştırmacılar; OPC'ye göre iyi bir fiziksel ve kimyasal dayanım, düşük CO<sub>2</sub> emisyonu, yüksek termal kararlılık ve iyi bir dayanım sağlaması gibi avantajları sebebiyle [12] geopolimer betonların araştırılmasını, geliştirilmesini ve kullanılmasını gerekli görmekte-dirler. Bu bölümde bahsedilenler, geopolimer terminolojisinin özetidir

## Çalışmanın Amacı

Yaptığımız çalışmada beton üretiminde, bağlayıcı malzeme olarak kullanılan Normal Portland Çimentosu (OPC) yerine sürdürülebilir ve çevreci malzemeler ile oluşturulan Geopolimer beton kullanılmıştır.

Geopolimer betonun kimyasal dayanımı, yüksek termal kararlılığı ve en önemli sebeplerinden birisi olan düşük karbondioksit salınımı ve sürdürülebilir çevre dostu bir malzeme olması sebebiyle Normal Portland Çimentosuna göre daha yararlı bir yapı elemanı olduğu ve kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Yaptığımız çalışmada, farklı karışım oranları ile hazırladığımız geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişiminin ve fiziksel, kimyasal durabilite performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Burada elde edilecek sonuçlar Geopolimer betonların standartlaşması için literatüre bir önayak olması düşünülmektedir. Böylece Geopolimer betonların yapılarda kullanımının önünün açılması tavsiye edilmiştir.

## Tezin Kısımları

Kısım 1. Özet ve Giriş: Tez çalışması özetlenerek önemi ve amacı anlatılmıştır.

Kısım 2. Literatür Araştırmaları: Geopolimerlerin literatür araştırmasına, silis dumanı, f-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı malzemelerin betona olan etkisine ve Geopolimerlerin asit bazlı saldırılara karşı kararlılığı konusundaki çalışmalar incelenmiştir.

Kısım 3. Deney Çalışmaları: Malzemeler, karışım oranları, döküm, numuneler, asit etkisi ve yapılan testler anlatılmıştır.

Kısım 4. Test Sonuçları ve Tartışmalar: Burada da elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiş olup, farklı Geopolimer betonların kimyasal etki altında nasıl bir performans gösterdiği ortaya koyulmuştur.

Kısım 5. Sonuçlar: Tezin sonuçlarına yer verilmiştir.



## Puzolanik Malzemeler

Puzolanlar, yalnız kullanıldıklarında bağlayıcılık açısından değeri çok az olan, fakat nemli ortam koşullarında kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girdikten sonra hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Ayrıca puzolan malzemeler çimentoya benzer özelliklere sahip bileşikler oluşturabilen alumino-silikat içeren malzemelerdir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS), F-tipi uçucu kül ve silis dumanı (SF) puzolanik malzemeler içerisinde en çok kullanılanlar arasında yer almaktadır. Kullanılan bu malzemelerin yeteri kadar bağlayıcılık özelliği göstermesi için içerisindeki alümino-silikat miktarı yüksek ve amorf yapıda olmalıdır. Çimentonun yerine betonda puzolanik malzeme kullanımı ile bağlayıcılık özellikleri sağlandığında betonun erken yaş mukavemetlerinde bir miktar azalma görülebilir fakat ilerleyen yaş mukavemetlerinde beton performansının artış gösterdiği belirtilmektedir [13].

Puzolan malzemeler çok ince olmasından dolayı taze beton içindeki agrega mobilitesinin işlenebilir ve yüksek oranda olmasını sağlar. Ayrıca su ile tepkimelerinde bağlayıcılık özelliği de gösterirler. Böylece taze betonda terlemenin (su kaybının) azalmasına ve betonların su ve kimyasal geçirimsizliğinin daha az olmasını sağlar. Betonda puzolan malzeme kullanımı ile beraber betonun sülfat direncinin artmasını ve alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan genişlemenin azalmasına yardımcı olur. Ayrıca, puzolanik malzemelerin yavaş hidrate olmasından ötürü hidrasyon ısısının hızını ve miktarını azaltır ve ileriki yaşlarda basınç dayanımının istenilen seviyelerde olmasını sağlar. Puzolan malzemelerin betonda dayanım ve durabilite açısından avantajlarının yanı sıra, atık malzeme olduklarından dolayı maliyetlerinin çimento maliyetinden daha az olması, puzolan malzemelerle üretilen betonların daha ekonomik bir beton olabileceğini göstermektedir. Puzolan içeren betonlarda dikkat edilmesi gereken hususlar ise, yavaş hidrate olmasından ötürü özellikle soğuk hava şartlarında betonun priz almasını geciktirir ve bu sebeple ilk yaş dayanımının az olmasına sebep olur. Bu sebeple puzolan içeren betonların kür koşullarına dikkat etmek gerekir ve uygulanacak kürü doğru seçmek gerekmektedir [14].

## Geopolimer Beton

Geopolimerin terminolojisi ve kimyası; Geopolimer, 1978 yılında Fransız bilim adamı Davidovits tarafından bulunmuş ve tanımlanmıştır. Alumino-silikat esaslı şekili olmayan ve mikro bir yapısı olan ve alkali bir ortamda üretilen iki alüminosilikat polimerle oluşmuştur. Kısaca puzolonik bir bileşik veya alumino-silikat içerir. Yapısı iki ile üç boyutlu silisyum-okso-alüminattan oluşur[15].

Geopolimerler, doğal minerallere ait kimyasal içeriklerinin ve kristalize olan yapıların farklı yöntemler kullanılarak değiştirilip oluşturulan malzemelerdir. Geopolimerlerde, genellikle bağlayıcı malzemeler olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, düşük ve yüksek kalsiyum içerikli uçucu küller ve çok ince taneli olmasından ötürü silis dumanı gibi endüstriyel atık malzemelerinden oluşmaktadır. Geopolimer, temelinde amorf killer ve benzeri malzemelerin kullanımı ile meydana gelen polimerize silikat ya da alüminosilikat içeren bileşenlerin alkali aktivatörler ile sentezlenmesi yöntemidir.

Alümino-silikat bazlı malzemelerin çeşitli alkali aktivatör aracılığıyla aktive edilmesi sonucunda Geopolimer betonlar dayanım kazanmaktadır.

## 2 . GEOPOLİMER BETON

### 2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Doğada demir cevheri demir oksit olarak bulunur. İçeriğinde alumina, silika ve kükürt içerikli yabancı maddeler yer alır. Demir cevheri, demir oluşumunun sağlanması için yaklaşık 1600 °C sıcaklığındaki fırınlarda kok komuru yerleştirilerek ısıtılır ve yakılır. Bu işlemin ardından gazlar ortamdan ayrılır ve eriyik olarak elde edilen yabancı maddelere cüruf adı verilir. Yüksek fırın içerisinde eriyik olarak alınan cüruf, havada yavaş bir şekilde soğutulursa kristalize bir yapısı olur ancak suya tabii tutulur veya hızlı bir şekilde soğutulursa irili ufaklı taneli olarak granüle duruma gelir ve amorf yapılı olur. Cüruf yapısında yüksek oranda CaO bulundurması sebebiyle bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Yüksek fırın cürufu çimento beton imalatlarında kullanılır. Taze betonda OPC yerine cüruf kullanılması, betonun işlenebilirliğini arttırmakta ve ekonomik fayda sağlamakla birlikte, betonun kimyasal saldırılara karşı geçirimsizliğini azaltmakta ve böylece daha iyi bir basınç dayanımına sahip olmasını sağlar [16].

Çimento karışımlarında ve alkali aktive sistemlerinde küçük parçacıklı cüruflar tercih edilir. Kimyasal bileşimleri genellikle OPC'ye göre daha fazla SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, daha az CaO içerir. 2 µm'den küçük parçalar bir gün boyunca tamamen hidrate olurken, 2 µm'den büyük parçalar genel olarak yavaşça hidrasyona uğrar. Bu nedenle cüruf ile üretilen Geopolimer beton içerisindeki bağların dayanımını sağlamak için granül büyüklüğünün doğru kontrol edilmesi gerekmektedir [17].

Normal Portland Çimentosunun depolanma safhasında nemli bir ortama maruz kaldığında önhidratasyon gösterir. Bu kapsamda cüruflar daha iyi bir depolanma özelliğine sahiptir.

Temel olarak bir endüstriyel malzeme olan yüksek fırın cürufu, sıvının su ile reaksiyona girmesi ile meydana gelir. İçerisinde ise, yüksek fırın içerisindeki demir malzemesi, aynı zamanda demir cevherinin eritme işleminden sonra geliştirilen silikatlar, alüminasilikatlar ve kalsiyum bulunmaktadır.

Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufunun hidrolik özellikleri bazı durumlarda değişiklik göstermektedir. Sınır değerine ulaşılan kadar CaO/SiO<sub>2</sub> değerinin artması ile beraber artış gösterir. CaO miktarının fazla olması beton mukavemetinde iyileşmeye neden olur. Ayrıca Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının artması aktiviteyi artırır.

### **2.1.1. Beton İçerisinde Yüksek Fırın Cüruf Kullanılması**

Cüruf, endüstriyel sanayilerin yan ürünüdür ve içeriğinde magnezyum, kalsiyum, ve alüminosilikat vardır. Betonda çimento yerine ortam sıcaklıklarında cüruf kullanılması, mukavemet artırımının daha düşük oranda olmasına neden olur. Bu kapsamda basınç dayanımlarındaki azalma miktarları, beton içerisinde kullanılacak olan öğütülmüş granule yüksek fırın cürufun aktivitesine bağlıdır. Kalsiyum, silikat ve hidrat çimentonun mukavemetini artırmaktadır. Çimento ve su karışımı esnasında, hidratasyon ve kalsiyum-silikat-hidrat ve kalsiyum hidroksit başlar. Kalsiyum hidroksitse, hidratasyon sonucu oluşur. Cüruf içerisindeki silikatlar CH ile birleşir. Bunun sonucunda bağlayıcı malzeme olarak yalnızca çimento ile üretilen betonla kıyaslandığında, esas mukavemeti artırabilecek sert bir bağlayıcı ve yoğunluğa sahip olur [18], [19].

### **2.2. F-Tipi Uçucu Kül**

F-tipi uçucu kül malzemesi , enerji üretimi yapan termik santrallerin çalışabilmesi için yakıt özelinde kullanılan pulverize kömür yakımı sonucu elde edilir. Taş kömürü veya linyitin yüksek sıcaklıklar altında yakılarak ortaya çıkmakta olup baca gazları ile birlikte sürüklenen elektrofiltre ve siklonlarla yükselirken havaya çıkması engellenir. Toz halinde bulunan ve biriken bu malzeme puzolanik niteliği olan silisli ve alümino silisli geopolimer malzemelerdir. Linyit kömürünün %20-%50'si, taş kömürünün %10-%15'i kül olarak açığa çıkar. Bu küllerin %75-%85'i yakım sonucu gaz ile kazan içerisinde ayrılarak meydana gelir ve bu F-tipi uçucu kül olarak ifade edilir. F-tipi uçucu küllerin havaya salınmadan tutulabilmesi için genellikle yüksek verimli elektrofiltreler kullanılır [20].

Kömür içerisindeki inorganik maddeler fırın içerisinde erir ve bacadan atılırken soğutularak tanecik halinde oluşurlar. Demir, kalsiyum ve magnezyum oksit, karbon maddeler haricinde yüksek oranda silika ve alumina içerir. Ayrıca amorf yapıya sahiptirler.

Pulverize kömür külleri ile doğal puzolanların kimyasında benzerlik görülmesi üzerine, küllerin puzolonik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. İlk yıllarda yapılan çalışmalarda istenilen beton üretilenmemiştir. Pulverize kömür küllerinin istenilen düzeyde puzolonik özellik gösterebilmesi için yanma sıcaklığının yüksekliği ve küllerin hızlı soğutulması gerektiği tespit edilmiştir. İstenilen kalitedeki malzeme 1930'lu yıllarda ABD'de elektrik üreten şirketlerde yan ürün olarak bulunmuştur. Bu sebeple, beton yapımında mineral katkı olarak uçucu küller 1932 yılında kullanılmaya başlanmıştır [21].

E.Devis ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma sonucunda, normal betonda kullanılan çimento oranında %30-%50'si kadarı yerine F-tipi uçucu kül eklendiğinde daha iyi beton dayanım değerlerine ulaşılabildiği belirlenmiştir. Böylelikle, 1937 yılı itibari ile, betonda mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmaya başlanmıştır. Uçucu küller, hidrasyon ısısı düşük olması sebebiyle istenilen beton yapımında ve özellikle de kütle beton yapımında kullanılabilir. Uçucu külün kullanıldığı ilk büyük proje, 1948 yılında yapımına başlanılan Hungry Horse Barajı'dır. Kütle betonu yapımı için oluşturulan betonda Portland çimento miktarının %32.4'ü yerine F-tipi uçucu kül kullanılmıştır. [22].

Uçucu küller, puzolanik özelliklere sahip,  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$ 'den meydana gelen,  $SiO_2$  muhtevası kütlece en az %25 olan, ince tozlu taneciklerdir [23].

1960'lı yıllarda uçucu küller birçok barajın (Yellowtail, Dworshak, Libby) kütle beton yapımında kullanılmıştır [24].

Bir yılda elde edilen uçucu kül miktarı 600 milyon ton civarında olup, %6'sı beton ve çimento sektöründe kullanılır. Türkiye'de ise Orhaneli, Soma, Çatalağzı, Yeniköy, Afşin-Elbistan, Çayırhan vb. santralleri olmak üzere toplam 11 termik santral bu alanda faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yılda toplam 13 milyon ton civarında uçucu kül elde edilmektedir.

Ancak ülkemizde kullanımı açısından sektör içerisinde yetersiz bilgi ve kül özelliklerinin yanma ve kömür cinsine göre sabit bir değerde olamaması sebebiyle kullanımı istenilen düzeyde değildir. İçlerinden yalnızca Çatalağzı termik santralinde F tipi uçucu külü edilir. Diğer 10 termik santralden C tipi uçucu kül elde edilir. Avrupa ülkeleri ve Amerikada ise kullanımı oldukça yaygındır. İlk yıllarda fabrika atığı olarak bertaraf edilen malzemenin şimdilerde kullanımı ve ticareti oldukça fazladır [25].

Uçucu küller, kömürün içerdiği katkı maddesine, cinsine ve yanma şekline göre kimyasal, fiziksel, puzolanik ve minerolojik özellikleri bakımından değişiklik gösterirler. Genellikle kömürün yanmasına bağlı olarak gri ve grinin tonları renklerinde olmaktadır. Yanmanın tamamen bittiği yerlerde siyah, yanmanın bitmeyip devam ettiği yerlerde ise açık gri renge sahiptir. Uçucu küllerin kimyasal içeriklerine bakıldığında,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bileşiklerinden oluşmaktadır. İçeriğindeki karbon miktarı, kömür cinsine ve yanma tarzına göre değişiklik gösterir. Kullanılan kömür cinsine göre içeriğindeki  $\text{CaO}$  farklı miktarlarda olabilir. Çevre dostu ve ekonomik olması uçucu kül kullanımını artırmaktadır.

Uçucu kül, ASTM C 618'ye ve ayrıca TS EN 197-1 ve TS 639 standartları kapsamında değerlendirilir. ASTM C 618 standardı esas alındığında C ve F olarak iki ayrı sınıfta incelenir. C sınıfında  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  %50'den fazla olmakla beraber  $\text{CaO}$  %10 civarındadır. F sınıfında ise  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  %70'den fazla olmakla beraber  $\text{CaO}$  %10 altı olarak görülmektedir. Genel olarak C sınıfı beton içerisinde daha bağlayıcıdır. TS EN 197-1'e göre ise Kalkersi (W) ve Silissi (V) olarak iki ayrı sınıfta değerlendirilir. W sınıfı genellikle ince bir toz halinde hidrolik ve puzolanik özellikte olup, içerik olarak büyük kısmı  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den ve kalan kısmı  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve malzemenin cinsine göre içerdiği farklı özellikteki küllerdir. Genel itibari ile  $\text{CaO}$  oranı %10'dan daha az ve reaktif silis miktarının da %25'den daha az olmaması gerekir. F sınıfı uçucu küller ise, ince dairesel taneciklerden oluşan puzolanik değerlere sahip olup, içeriğinin büyük bir bölümü reaktif silisyum dioksit  $\text{SiO}_2$  ve alüminyum oksitten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kalan kısmı ise oksit ve malzemenin cinsine göre diğer bileşenlerinden oluşur. Bu küllerde,  $\text{CaO}$  oranının %10'dan daha fazla ve reaktif silis miktarının %25'den daha az olmaması gerekir [26].

### 2.2.1. Geopolimer Beton İçerisinde F-Tipi Uçucu Kül Kullanılması

F-tipi uçucu külünde malzeme içeriği genellikle silisli ve alüminli olduğu için beton katkı maddesi olarak kullanılması yararlıdır. Teknoloji ve inovasyon süreçlerinin hızlı ilerleyişi enerji ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Bu talep doğrultusunda karşılanması gereken enerji miktarının temini her geçen gün daha pahalı olmaktadır. Bu sebeple sürdürülebilir ve yenilikçi bir çözüm olarak kullanılan uçucu külün tarihi diğer puzolan malzemeleri gibi eski olmasada sektördeki ihtiyaç sebebiyle kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır.

Endüstriyel atık malzemelerinden elde edilen uçucu külün taze ve sertleşmiş beton içerisinde kullanımı oldukça yararlıdır. İnce taneli ve dairesel yapıları sebebiyle uçucu küller betonun kalitesini ve işlenebilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca uçucu kül ikamesi çimentoda oluşan hidrasyon ısısını azaltır. İlave jel görevi görür ve çimento içerisindeki boşlukları azaltır. Bunun sonucu olarak beton mukavemetinin artmasına sebep olur [27].

Geopolimer bağlayıcılar içerisindeki CaO, betonun maruz kalabileceği kimyasal etkilere karşı yükek direnç gösterir. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar sertleşmiş betonun yüksek dayanımlı olarak gelişimine katkı sunar ve bu sebeple normal Portland çimentosuna göre alternatif sağlamaktadır [28].

Uçucu kül kullanılan geopolimerlerde ısıl kürlenme sorunu ile karşılaşılabilir. Bu nedenle yerinde dökümü gerçekleştirilecek beton uygulamalarında genellikle tercih edilmemektedirler. Ancak beton reçetesine uygun oranda nano-silika eklenmesiyle ısıl kürlenme sorunu giderilebilir. Bu durum Si ve Si-Al reaksiyonu içerisindeki çözünme miktarında artış sağlar ve polimerizasyon sürecini yükseltir [29].

### 2.3. Silis Dumanı

Silikon metalinin veya alaşımların, saf ve ham halde bulunan kuvarsın elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta indirgenmesiyle elde edilir. Bu indirgeme işlemi sırasında yüksek miktarda SiO gazı açığa çıkmaktadır. Akabinde fırın içerisindeki daha soğuk bir bölgede havayla temas etmesi ile aniden yoğunlaşmaktadır. Bu işlem sonucunda SiO, camsı yapıda SiO<sub>2</sub>'ye dönüşmektedir. Böylece amorf yapıya sahip “yoğunlaştırılmış silis dumanı” ya da “silika tozu” elde edilir [30].

Silis dumanı, betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilceği, 1950’de Norveç Teknoloji Enstitüsünde çalışılmıştır. Çalışma sonucunda iyi değerler elde edilmesi ile Oslo’daki Blindtarmen Tüneli’nin beton yapımında katkı malzemesi olarak yaklaşık %15 oranında silis dumanı kullanılmıştır. Amerika’da ise ilk araştırmalar 1971 ve 1980 yıllarında Sherbrooke Üniversitesinde P.C. Aitcin ve Kaliforniya Üniversitesinde P.K. Mehta tarafından başlamıştır [31].

### 2.3.1. Betonda silis dumanı kullanımı

İçeriğinde yüksek oranda silika bulunması, amorf yapıya sahip olması ve taneciklerinin çok ince yapıda olması sebebiyle aktivitesi çok yüksek bir puzolan çeşididir. Bu puzolan malzemesi, çimento üretimi ile birlikte genellikle betonda katkı malzemesi olarak kullanılır. Betonda kullanılması sonucunda, beton içerisindeki çimento miktarını %10’a kadar azaltmaktadır. Ayrıca puzolanik aktivitesinin yüksek olması neticesinde yüksek dayanımlı betonlar elde edilebilmektedir [32].

### 2.4. Alkali Solüsyonlar

Geopolimer betonların üretilebilmesi amacıyla puzolonik malzemeler, alkali solüsyonlar ile desteklenerek (sodyum hidroksit ya da potasyum hidroksit) karışımları ile oluşturulur. Xu ve Van Deventer (2000) yaptıkları araştırma ve çalışmalar sonucunda, alkali çözeltilerle kaynak materyaller arasındaki reaksiyonu NaOH sıvısı ekleyerek iyileştirmişlerdir [33].

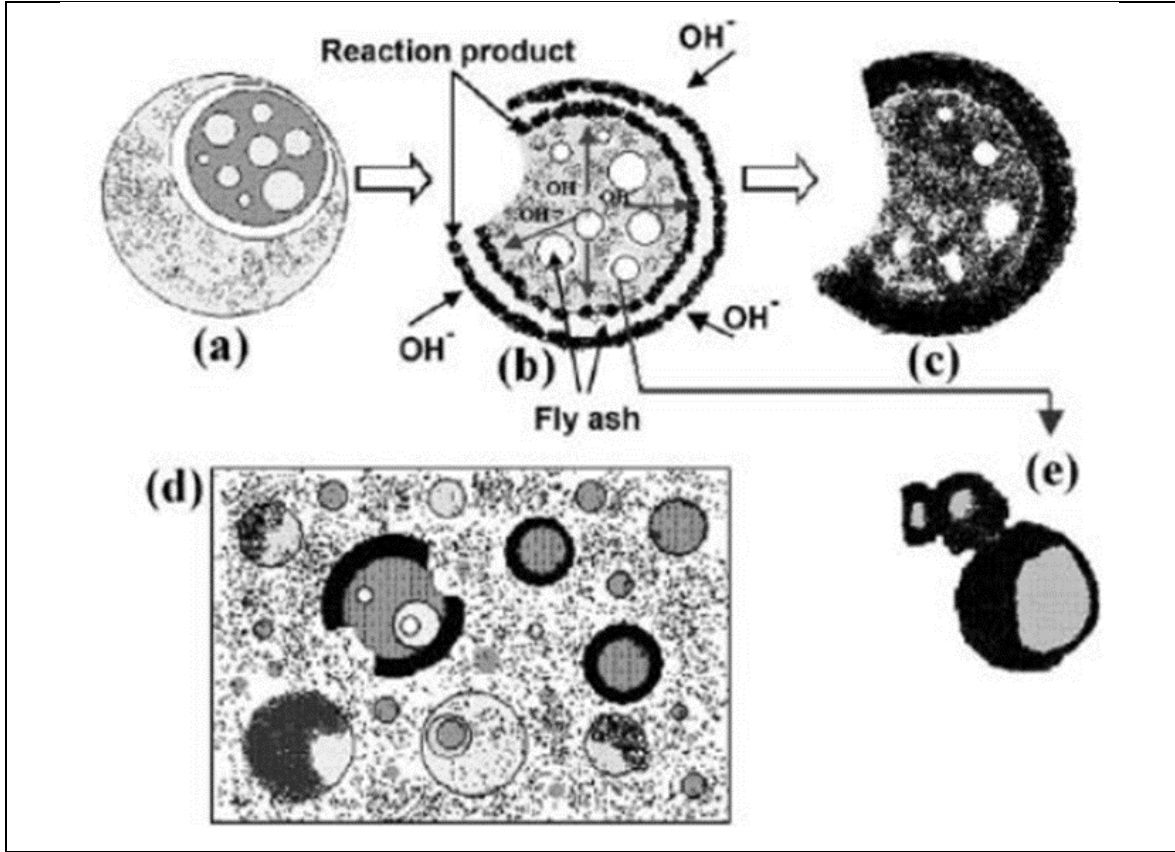
Palomo ve arkadaşları tarafından yapılan uygulamada alkali aktivatörlerin f-tipi uçucu kül puzolanının aktive edilmesinde kullanılması ile beraber reaksiyon gelişiminin etkili ve olumlu ölçülerde iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Bu reaksiyonların alkali solüsyonlarda yalnızca tek alkali kullanılarak karşılaştırıldığında silikat, potasyum ya da sodyum silikat içerdiğinde tepkimelerin belirli süre içerisinde arttığını açıklamışlardır [34].

Yapılan çalışmalarda kimyasal aktivatörler içerisinde yapının performansına en olumlu katkıyı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve NaOH çözeltilerinin sağladığı elde edilmiştir. Alkali aktivatörlerin betonda asit saldırılarına olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Alkali aktivasyon ile aktive edilecek olan hammaddenin cinsine bağlı olarak ayrı mikro yapıda olan farklı reaksiyon ürünleri ortaya çıkabilir. Bu sebeple, alkali aktivasyon prosesi iki ayrı şekilde oluşturulur.



Bunlardan ilki CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO modeli olup, bu model CaO açısından zengindir. İkinci üründe ise CaO, yüksek yapıda SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerine sahiptir [35].

Geopolimer malzeme içerisinde malzemelerin (alüminyum ve silika) parçalanması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1 Uçucu kül - alkali aktivasyonu [36]

Geopolimer beton üretimi için çeşitli alkali sıvıları kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit araştırmalar ve deneylerde genellikle en çok tercih edilen aktivatörlerdir. Yapılan bir çalışmada sodyum hidroksit ile sodyum silikatı birleştirerek jeopolitik uçucu kül çimentolarını geliştirmişlerdir [37].

Davidovits (1994) uçucu kül içerisindeki silika ve alumina iyonlarının çözülebilmesi amacıyla yüksek alkali çözeltilerin kullanılmasından söz etmiştir. Alkaliler, geopolimerlerin ana bileşenleridir. 1940'larda Belçika da Purdon Kimya Endüstrisi Derneği dergisi içerisinde ilk olarak yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu prensibinde kullanılabileceği belirtilmiştir [38].

## 2.5. Geopolimer Betonda Durabilite

Sertleşmiş betonun yapısında var olan kalsiyum hidroksit sodyum sülfatlarla tepkimeye girerek kalsiyum sülfat oluşturur. Beton içerisinde birleşen kalsiyum sülfat sertleşmiş betonda genleşmelere neden olabilir. Sülfat atakları neticesinde çatlak ve genleşmelerin meydana geldiği reaksiyonlarda, betonun yapısındaki bozukluklar ile beraber C-S-H'nin tahribiyle de beton yüzeyinde parçalanma ve yumuşama durumu görülür. Ancak içeriğinde kalsiyum miktarının az olduğu uçucu kül kullanımı sonucunda ısı kürü ile sertleşmeye başlayan kalsiyum oranı düşük geopolimer betonlarda, sülfat atağına dayanım gösteren etkili bir çözüm sağlamaktadır. Sodyum sülfat etkisi altında bırakılan beton numunelerinde yaklaşık bir yıl boyunca yüzeyinde etkili bir bozulma ya da çatlama görülmemiştir. Buna karşılık basınç dayanım değerleri ise hemen hemen aynıdır. Yapılan değişik sülfat tepkimelerinde ise en olumlu performansı sodyum hidroksit tepkimesiyle oluşturulan geopolimer malzemede görülmüş olup, artan ısı kürü ile beraber basınç dayanımının da aynı şekilde artarak ilerlediği belirlenmiştir. Ayrıca numuneler asit içerisine bırakıldığında betonlarda yaklaşık %10 oranında mukavemet kaybı yaşandığı belirlenmiştir [39].

Normal Portland çimentosu kullanılarak elde edilen betonda kimyasal dayanım testleri gerçekleştirildiğinde sülfat etkisi altında karışık bir yapı ve fiziksel, mekanik özelliklere sebep olduğu gözlemlenmiştir. Diğer bir neden olarak çimento hidrasyonu ürünleri ile çözeltiler arasında gerçekleşen reaksiyonların olumsuz olmasıdır. Normal Portland çimentosuna ilave olarak sülfat etkili reaksiyon tetlerinde, C-S-H, CH ve diğer farklı çimento macunlarında alüminat faktörlerinin de ortaya çıkararak reaksiyonlar geliştirilebilir [40].

Yapılan çalışmalarda, beton içerisinde bağlayıcı olarak OPC yerine geopolimerlerin kullanılmasının betonun geçirimsizliğini ve dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Bu sebeple düşük C<sub>3</sub>A oranına sahip çimento kullanımı ya da mineral katkı ile üretilmiş geopolimer malzemeler kullanılarak sülfat saldırılarına karşı dayanımının artacağı ifade edilmektedir.

### 2.5.1. Sülfürik Asit Durabilitesi

Kimyasal saldırılara maruz kalacak olan sertleşmiş beton içerisinde normal Portland çimentosu yerine atık malzeme katkılı geopolimer betonun kullanılması, kullanılan ince malzeme nedeniyle geçirimsizliği azaltarak betonun asit etkisine karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Kimyasal etkiler, çimentonun hidratasyonu sebebiyle oluşan yeni ürünleri beton içerisinde ayrılması, erimeyenlerin ise betonu parçalaması ve yüzeyini ufalaması şeklinde görülür. Beton içerisinde, kimyasal ve asit saldırılarına en hassas olan bileşenlerden birisi  $\text{CaOH}_2$ 'dir. Ayrıca C-S-H'lar da saldırı sonucunda hasar görebilir. Asitin cinsine, etkileme süresine ve yoğunluğuna göre reaksiyonların şiddeti ve hızı değişir. Asitin en önemli etkeni kalsiyum tuzunun çözünürlüğüdür. Çözünürlüğün artmasına bağlı olarak su ile çözünen maddeler betonda zararı artırır. Böylece betonun en dış kısmından başlamak üzere yumuşama, kabarcıklar ve gözeneklenme meydana gelir [41].

Glukhovsky yaptığı çalışmasında yüksek fırın cürufu ile hazırlanan harç içerisinde alkali aktivatör kullanarak yaptığı testler sonucunda hidroklorik asitlerin  $\text{pH}=3$  değerine ulaştıktan sonra bile geopolimerlerin gerilme mukavemetinde artış gözlemlendiğini belirtmiştir [41]. Aynı zamanda geopolimerlerin farklı süreler içerisinde asit etkisine maruz bırakılmasını incelemiş ve beton dayanımlarında bir miktar düşüş yaşandığı belirtilmiştir. Sülfürik asit ile yapılan deneylerde ise Portland çimentolu betonlara göre geopolimer ile üretilen beton yüzeyinde değişimin daha az görüldüğü belirlenmiştir. Hidroklorik ve nitrike maruz kalan betonlarda ise yüzey ve davranış değişimlerinin az olduğu belirlenmiştir [41].

Davidovits ve arkadaşları yaptıkları çalışma sonucunda, %5'e yakın sülfürik ve hidroklorik asit çözeltilerinde normal Portland çimentosu kullanılan betonlar ile geopolimer betonları bir ay boyunca kimyasal etkilere maruz bırakılmış, neticesinde alkali solüsyonları ile elde edilen geopolimer betonlarda kimyasal etkiler sebebiyle ağırlıklarında %7 civarında azalma yaşandığını, Portland çimentosu kullanılan betonda ise %85 civarında ağırlıklarında kayıp yaşandığını belirtmiştir [42].

Palomo ve arkadaşları, sodyum hidroksit kullanılarak aktive ettikleri geopolimer betonlarda 90 gün süre ile sodyum sülfata (pH=6) ve sülfürik aside (pH=3), deniz suyuna (pH=7) maruz bırakmış ve sonuç olarak eğilme dayanımının 28. güne kadar belirli bir seviyede azabileceği, 28-56. günleri arasında eğilme mukavemetlerinde bir miktar artış gözlemlendiği fakat 56-90. günleri arasında ise eğilme mukavemeti değerlerinde bir miktar azalma gözlemlendiğini bildirmişlerdir [43].

Yapılan başka bir çalışmada karışım oranları farklı betonların nitrik asit etkisinde beton dayanımları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda betonlar, nitrik asit etkisine maruz bırakıldığında, pH değeri düştükçe beton yüzeyinde daha fazla bozulmanın gerçekleştiği görülmüştür [44]. Ayrıca bu çalışmada farklı asit etkilerinde betonlardaki eğilme davranışları gözlemlenmiştir. Kimyasal etki sonucunda kırılgan dayanımlarında benzer etkilerin olduğu gözlemlenmiştir.

Kurtoğlu ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında uçucu kül Geopolimer beton, yüksek fırın cürüflü Geopolimer beton ve Portland çimentolu beton üretmişlerdir. Çalışmada bu betonların deniz suyu, magnezyum sülfat ve sülfürik asit kimyasalları altında durabilite çalışması yapılmıştır. Sonuçlara göre, sülfürik asit diğer kimyasal etkilere göre Portland ve Geopolimer betonlara en çok zarar veren kimyasal olmuştur. Diğer taraftan da deniz suyu ise diğer kimyasal nazaran en az zarar veren kimyasal etki olmuştur. Sülfürik asit etkisine bırakılan betonlar içerisinde uzun süreli dayanım performansında en iyi durabiliteyi sahip betonunun cürüflü Geopolimer beton olduğu, daha sonra uçucu külle yapılan geopolimer betonların olduğu ve en kötü performansı da Portland çimentolu betonun gösterdiğini bildirmişlerdir [45].

Çevik ve arkadaşları ise yapmış oldukları çalışmalarında normal Portland çimentosu, uçucu küller ile üretilen geopolimer betonu magnezyum sülfat, deniz suyu ve sülfürik asit etkisine bırakarak incelemişlerdir. Geopolimer betonun normal Portland çimentosundan daha üstün durabilite performansı sağladığını belirtmişlerdir. Kimyasal etkiler arasında betonlara en zarar veren kimyasal etkinin sülfürik asit olduğunu belirtmişlerdir [46].

Song ve arkadaşları, normal Portland çimentolu beton ile uçucu küllü Geopolimer betonları %10 sülfürik asit çözeltisinde 8 hafta boyunca etki altında bırakmıştır. Bu kapsamda beton yumuşamasından ve parça kopmasından dolayı Geopolimer betonda %3'lük bir ağırlık kaybı gözlemlenirken, normal Portland çimentosunda ise %35'lik bir ağırlık kaybı yaşandığı belirlenmiştir [47].

Bakharev ve arkadaşları normal Portland çimentosuyla üretilen beton ile sodyum hidroksitle aktifleştirilen cüruf bazlı Geopolimer betonu asetik asit saldırısına maruz bırakarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Geopolimer betonda asetik asit dolayısıyla %33 oranında ağırlık kaybı yaşanırken, Portland çimentosu ile yapılan betonda ise %47 ağırlık kaybı yaşanmıştır. Normal Portland çimentosu ile üretilen betonda yüksek CaO içermesi sebebiyle bozulmanın daha fazla yaşandığı belirtilmiş olup, Geopolimer beton içerisinde daha az CaO olduğundan dolayı asetik asit etkisi altında Portland çimentosuna nazaran daha iyi bir performans sağladığını belirtmişlerdir [48].

## 2.6. Geopolimer Betonun Özelliği

Geopolimer betonlarda dayanım ve durabilite testleri ile beraber betonlarda kimyasal ve fiziksel özellikleri araştırmak amacıyla çeşitli araştırmalar ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Davidovits geopolimer betonlar üzerinde sülfat, asit etkisine karşı, korozyon, çözünme, erken ve yüksek dayanımları gibi deneyler gerçekleştirmiş ve Geopolimer betonların birçok konuda Portland çimentolu beton özelliklerine göre daha iyi performansı olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında geopolimer betonların 7 günlük basınç dayanımının 35-40 MPa'ya kadar ulaştığını, bu da basınç dayanımının yaklaşık %85'ini olduğunu belirtmiştir. Geopolimer betonlarda erken dayanımın normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre daha hızlı ulaştığını belirtmiştir [49].

Comrie ve arkadaşları, yaptığı bir çalışmada Geopolimer malzemelerin kimyasal saldırılara karşı iç yapısının farklı olması sebebiyle normal Portland çimentosundan daha üstün performans sergilediğini belirtmişlerdir. Geopolimerlerin, normal Portland çimentosuna göre hem mekanik performans açısından hem de durabilite performansı açısından daha üstün olduğu yapılan araştırmalarda ortaya konmuştur [50].

Alkali aktivatörler ile elde edilen geopolimer bağlayıcıların normal Portland çimentosuna göre asit etkisine olan kimyasal durabilitesi daha iyidir. Normal Portland çimentosu içerisinde bulunan yüksek CaO sebebiyle asit etkisine daha az dirençlidir, bu sebeple Portland çimentolu betonda fazla miktarda bozulma gerçekleşmektedir.

## **2.7. Geopolimer Beton Dayanım ve Durabilitesi**

Beton durabilitesi değişik kimyasal ve fiziksel nedenlerle bozulduğundan dolayı betonun mekanik dayanımında azalmaya sebebiyet verebilir. Üretilen beton, fiziksel ve kimyasal etkilere sürekli ve birbiri ardılı maruz kalabilir ve bu saldırılar sonucunda diğer etkilerin betondaki hasar etkisi artabilir. Açıklamak gerekirse, fiziksel etkiler sonucunda yüzeyinde çatlaklar oluşan sertleşmiş betonda geçirimsizlik azalır ve bu durum kimyasal etkilerin betona daha kolay zarar vermesine sebep olur. Ayrıca betonun kimyasal saldırılar sonucunda gözenekliliğinin artması, fiziksel bir etki olan aşınmaya karşı dayanımın azalmasına sebep olur. Kimyasal saldırılar altında, asit çözeltilisinin etkisiyle betonda ani bir şekilde mekanik aşınmaya da sebebiyet vermesi sebebiyle beton içerisindeki bozulmalar özellikle zaman arttıkça beklenilenden daha fazla olabilmektedir.

### **2.7.1. Betonda Büzülme**

Betonda büzülme, betonun hacmi içerisinde zamanla oluşan azalma olarak ifade edilir. Kimyasal, plastik, şişme, hidrasyon, karbonatlaşma, kuruma, termik ve kuruma büzülmeleri olarak sınıflandırılabilir. Taze ya da henüz prizini tam almamış beton süreç içerisinde su kaybına bağlı olarak ortamdaki sıcaklık farkları sebebiyle kılcal (rötre) çatlaklar, büzülmeler oluşur. Plastik rötre; taze beton içerisinde suyun ortamdaki sıcaklık farkı sebebiyle buharlaşması işlemine terleme adı verilir. Bu sebeple beton yüzeyi hızlı kuruyarak plastik büzülme gerçekleşir. Şişme ise özellikle çimento hamurunun su ile tepkimesi sonucunda beton hacminde ve ağırlıklarında ufak bir miktar artma yaşanabilir. Bu hacim değişikliği negatif büzülme olarak ifade edilir. Hidrasyon büzülmesi; Suyun beton içerisinde herhangi bir sebepten kaybolması sonucu, kapiler boşluklar içerisindeki rölatif buhar basıncının azalması sebebiyle hidrasyon yavaşlar ve bu hidrasyon büzülmesi olarak ifade edilir. Karbonatlaşma büzülmesi; Kalsiyum hidroksit ile havada bulunan karbondioksitin tepkimesi sonucu kalsiyum karbonat oluşarak bir miktar su betonda açığa

çıkar ve bu karbonatlaşma büzülmesi olarak ifade edilir. Kuruma büzülmesi; Sertleşen beton içerisindeki su miktarının buharlaşma sonucunda kaybolması kuruma büzülmesi olarak ifade edilir. Termik rötre; Prizi tamamlanan ve sertleşme sürecine giren beton içerisindeki hidrasyon ısısının tüm kütle için ısıtmaya yetebilecek oranda artmaması sonucunda kütlelerin soğuması termik büzülme olarak ifade edilir [51]. Betonda büzülmelerin engellenmesi için; ince bağlayıcı malzemelerin Kullanımı, çimento dozajının azaltılması, taze betonun iyi sıkıştırılması, yeterli su kullanılması ve kütleme işlemlerinin eksiksiz yapılması gerekmektedir.

Geopolimer ve Portland çimentolu betonlar kimyasal etkilere (deniz suyu, magnezyum sülfat ve sülfürik asit) maruz kaldıklarında ilk önce negative büzülme (şişme) meydana gelebilir. Betonlar böyle ortamlardaki mevcut sıvıyı emecekleri için ilk önce ağırlıklarında artma meydana gelebilir. Bu olay kimyasal etkinin betona zarar vermesiyle son bulur. Özellikle sülfürik asit gibi ortamlarda beton yüzeyinde zamanla meydana gelecek aşınmadan dolayı bu ağırlık artması yerini parça dökülmelerinden dolayı ağırlık azalmasına bırakmaktadır. Ağırlık kaybının fazla olması betonun daha çok bozulduğuna işaret eder.

### **2.7.2. Alkali – Silika Tepkimesi**

Beton içerisindeki alkali-agrega reaksiyonu nedeniyle oluşan hasarlar, agrega taneleri arasındaki reaktif bileşenlerle çimento hidrasyonu sonucunda açığa çıkan alkali hidroksitler arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucudur. Alkali agrega reaksiyonu sonucunda 2 adet oluşum meydana gelmektedir, bunlar alkali-karbonat reaksiyonu (AKR) ve alkali-silika reaksiyonu (ASR) oluşumlarıdır.

Bu iki reaksiyondan en yaygın olarak görüleni alkali-silika reaksiyonudur. Alkali-karbonat reaksiyonu, kireçtaşı veya kalsit, kil içeren ince taneli kireçtaşı agregalarından oluşmaktadır. Alkali-silika reaksiyonu ise beton gözenek suyu içerisinde bulunan hidroksil iyonları ile beraber beton agregası içerisindeki reaktif silis içeren agregaların arasında oluşmuş bir reaksiyondur. Çimentodan gelen alkaliler ile agregalardan kaynaklanan reaktif silikanın birleşmesiyle ASR jel ürünleri meydana gelir ve sonrasında alkali-silika jelleri ile ortamdaki nem ile birleşerek betonda genleşmeler meydana gelir. Oluşan genleşmelerin betonun çekme mukavemetini aşması sonucunda betonda çatlaklar ve bozulmalar görülür.

Ayrıca normal Portland çimentosu içerisinde bulunan  $\text{Ca(OH)}_2$  sebebiyle alkali oksitlerle reaktif silika formlarını içeren agregaların arasında oluşan bu reaksiyon neticesinde de betonda genleşme meydana gelir. Normal Portland çimentolu üretilen betonda alkali-silis jelinin şişmeye sebep olacağı için alkali-silikayı engellemek için betonda kullanılması gereken su-çimento oranı düşük olmalıdır. Ayrıca geopolimer betonda kalsiyum oksitin az olması sebebiyle beton tepkimeye girmeden geçirimsiz bir form oluşturur [52].

Allouche ve Patil yaptıkları bir çalışmada alkali-silika reaksiyonunun betonlara etkisi değerlendirmişlerdir. Geopolimer betonların normal Portland çimento kullanılan beton ile kıyaslandığında, Geopolimer betonların alkali-silika reaksiyonuna daha dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir [53].

### **2.7.3. Sıcaklık etkisi**

Geopolimerler, normal Portland çimentolarına karşı yüksek sıcaklığa karşı daha üstün performans gösterirler. Özellikle cüruf esaslı Geopolimer betonlar Portland çimentolu betona nazaran daha yüksek basınç mukavemeti değerlerine sahiptir. Ayrıca kimyasal ve yüksek sıcaklıklara karşı durabilitesi de normal Portland çimentosuna göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Zuda ve arkadaşları yaptıkları çalışmasında uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonlarla ilgili deneyler gerçekleştirmiş, geopolimer betonların hedef basınç mukavemeti değerlerini  $400^\circ\text{C}$  bandına kadar koruduklarını belirtmişlerdir. Geopolimer beton içerisinde etkili sıcaklıklara karşı, alkali solüsyonları ile oluşturulan alüminosilikat malzemesi iyi bir direnç göstermektedir [54].

### **2.7.4. Islanma - Kuruma Çevrimleri**

Beton gözeneklerinin, ortamda bulunan su ve nem hareketleri sebebiyle etkilenmesi ve bu olayların tekrar etmesine ıslanma-kuruma döngüsü denilmektedir. Betondaki gözenekli yapı sebebiyle, sülfatlar, klorürler, alkaliler, asitler gibi zarar veren maddelerin gözeneklerde birikmesi ve bu zarar veren maddelerin hareketlerine karşı koyabilmesi, betonu etkileyebilecek bu etkenlere karşı durabilitesinin artmasını sağlar [55].



Betonun kuruması sırasında, gözeneklerden ıslanma-kuruma süreçlerinde oksijenin beton içine nüfuz etmesi sebebiyle korozyon başlangıcı gerçekleşir. Oksijen, nemli ortamda bulunan betonda gözenekleri dolmuş durumda bulunması sebebiyle betonun içine geç etki eder. Ancak beton kurduktan sonra gözenekler daha az dolgun haldeyken oksijen betona etki etmeye başlar ve zamanla beton içerisindeki donatılar korozyona uğrar.

Örneğin, su altında kalmış birkaç yapı ve ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılmış yapılar arasında bir inceleme gerçekleştirildiğinde ıslanma-kuruma döngüsüne uğratılan yapılarda daha çok bozulma olduğu belirtilmiştir [56]. Bunun sebebi olarak ise, su altında kalmış bir yapıda betona oksijen girişi olmayacağından, donatı korozyonunun olması için en önemli şart engellenmiş olur. Islanma-kuruma çevriminde ise özellikle beton kuruma sırasında beton içine hem klor hem de oksijen difüzyonu sağlanmasından ötürü betonda donatı korozyonu daha hızlı gerçekleşecektir.

Normal Portland çimentosu kullanılarak üretilen beton içerisinde önemli bir bileşeni olarak bulunan CaO, agresif sülfat ve asit ile reaksiyona girdiğinde betonda daha fazla bozulma olmasına sebep olur. Yapılan bir çalışmada, ısı kürü uygulanmış Geopolimer betonlar, normal Portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara kıyasla daha iyi ıslanma ve kuruma dirençleri ve buna bağlı olarak daha az bir büzülme oluşturduğu ifade edilmiştir [57].

## **2.8. Geopolimer Betonlarda Dayanım ve Durabilite Parametreleri**

### **2.8.1. Geopolimer betonda kullanılan su miktarı**

Geopolimer ile üretilen betonların dayanımlarını etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi de karışımın içerisindeki su miktarıdır. Geopolimer betonlara gereğinden fazla su eklemek betonun işlenebilirliğinin artmasını sağlayabilir fakat su miktarının betonun içerisinde artmasıyla beraber Geopolimer betonun basınç dayanımında azalma meydana gelir. Normal Portland çimentosu ile üretilen betonun su/çimento oranı değiştikçe basınç dayanımı değişmektedir. Benzer şekilde, Geopolimer betonlarda alkali aktivatör/bağlayıcı malzeme oranı ile basınç dayanımı değişmektedir [58].

### 2.8.2. Silisyum Dioksit / Sodyum Oksit oranı

Geopolimer betonların mukavemetini etkileyen etken parametrelerden bir tanesi de silisyum oksit / sodyum oksit oranıdır. Buradaki alkali-silikat çözeltisinde çözünen alkaliler polimerizasyonun derecesini etkiler. Geopolimerizasyonun artması ile Geopolimer betonların basınç dayanımları artmaktadır [59].

### 2.8.3. Isı Kürü ve Süresi

Geopolimer betonlar tasarlanırken dikkat edilmesi gereken özelliklerden bir diğeri ise numunelerdeki kürlemenin zamanı ve maruz kalacağı sıcaklıkların belirlenmesidir. Çünkü özellikle uçucu kül malzemesinin düşük sıcaklıklarda aktive olmamasından dolayı uçucu külle Geopolimer betonların basınç dayanımlarının gelişimi için ısı kürüne ihtiyaç duyulmaktadır. Isı kürü uygulanan Geopolimer betonlarda yüksek sıcaklık etkisinden dolayı alkali aktivasyonların tepkime hızı artmaktadır ve böylece Geopolimer betonların basınç dayanımları artmaktadır.

Yüksek kür sıcaklığına maruz kalan geopolimer betonların erken dayanımında yüksek artışlar görülür. Yapılan bir çalışmada, daha uzun ısı kürüne maruz bırakılması sonucunda oluşan sertleşmenin polimerizasyon sürecini hızlandırdığı ve bu durum numunelerin erken basınç dayanımı almasını sağlamaktadır. Ayrıca geopolimer içerisindeki alkalilerin miktarına bağlı olarak betonun daha kısa süre içerisinde priz aldığı belirlenmiştir [60].

### 2.8.4. Alkali Aktivatör Oranı

Sodyum hidroksit (NaOH) aktivörüne sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) eklenerek geopolimer betonun mekanik performansı artırılabilir. Kullanılan alkali malzemesinin oranı Geopolimer betonda basınç dayanımını ve kimyasal etkilerde maruz kaldığında durabilitesini doğrudan etkilediği için alkali malzemenin oranının dikkatli hesaplanması gerekmektedir. Yapılan bir araştırmada, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranında geopolimer betonların mekanik özelliği ve öncül dayanım özelliği üstünde etkili olduğu belirlenmiştir.

Sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranlarının artması ile Geopolimer betondaki basınç dayanımının da artacağı belirlenmiştir [61].

### 2.8.5. Sodyum hidroksit Molaritesi

Geopolimer betonlarda sodyum hidroksit çözelti, molarite (M) şeklinde kullanılır. 6M ile 14M arasında sodyum hidroksit çözeltileri hazırlanıp Geopolimer betonlara ikame edilmektedir. Daha yüksek molariteye sahip sodyum hidroksit çözeltilerinde kalsiyum hidroksit oluşumu ve kimyasal çözünme görülebilir. CH'nin içerik olarak azaltılması sonucunda betonda üstün dayanım performansı görüldüğü belirlenmiştir. Bu hususta, sodyum hidroksit çözeltilerinde konsantrasyon (molarite) etkisi geopolimer betonda daha yüksek basınç mukavemeti oluşumuna sebep olmaktadır [62]. Aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanımı sonucunda, beton gözeneklerdeki sıvılarda Ph derecesini ve hidrasyon aktivesini düzenler ve bu durum geopolimerlerde C-S-H üretiminin ana hattını doğrudan etkiler. Sodyum hidroksit konsantrasyonu ile ısının üretilmesi arasında ilişkin olduğu söylenebilir [63].

Geopolimer betonun yukarıda belirtilen parametrelere bağlı olarak basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve durabilite çalışmaları, Geopolimer betonun standartlara girmesi açısından çok önemlidir. Bu konuda yapılan ve yapılacak çalışmalar Geopolimer beton davranışının anlaşılması bakımından önem arz etmektedir.

Yacob ve arkadaşları [64] yaptıkları bir çalışmada F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer betonun kesme dayanımını incelemiştir. Çalışma, dört Geopolimer Beton (GB) kiriş ve bir Geleneksel Beton kiriş testini içermektedir. Kirişlerde farklı enine (kesme) donatısı ve kesme açıklığı/etkili derinlik oranı (a/d) mevcut olmuştur. Kesme davranışı, çatlak morfolojisi ve ilerlemesi, yük-eğilme tepkisi, kırılma mekanizması, kırılmadaki uzunlamasına donatı çekme gerilmeleri, kayma deformasyonu ve betondaki ortalama kayma gerilmesi açısından incelenmiştir. GB kirişlerinde çatlak ilerlemesi Geleneksel Beton kirişlerine benzer olmuştur. İncelenen farklı test değişkenine bağlı olarak kesme ve kesme-eğilme çatlaklarını içeren GB kirişlerinin test edilmesi sırasında farklı çatlak desenleri gözlenmiştir. Ayrıca, Geleneksel Beton kirişlerin kesme dayanımını etkileyen parametreler, yani kesme donatısı, a/d ve beton basınç dayanımı, GB kirişlerinin kesme dayanımını da etkilemiştir. Bu çalışmada GB kirişlerinde, kesme açıklığı-etkin derinlik oranının 2.0 ile 2.4

arasındaki değişimi, kırılma modunu kesme kırılmasından kesmeli eğilme kırılmasına değişirmiştir. Benzer şekilde, kesme donatısının etriyesiz durumdan  $\phi 10@191$  mm (#3 @ 7.5 inç) seviyesine getirilmesi, kırılma modunu kesme kırılmasından kesmeli eğilme kırılmasına değişirmiştir. Ayrıca, yük-eğilme tepkisi açısından, GB kirişi, benzer takviye ile Geleneksel Beton kirişiyle hemen hemen aynı s¼neklięi g¼stermiřtir. Kayma deformasyonu ve asal şekil değişirme, makaslama ve burulma-makaslama kırılması oluşan kirişlerde belirgin iken, makaslama-eğilme kırılması oluşan kirişlerde daha az belirgin olmuştur.

Tran ve arkadaşları [65], elik liflerle g¼çlendirilmiř geopolimer beton (GB) kirişlerin eğilme davranışı üzerine bir çalışma y¼r¼tm¼řtir. Hacim oranı ve lif uzunluğunun, GB kirişlerinin eğilme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. GB kirişlerinin geleneksel Portland betonu (GPB) kirişlerine karşı ayırt edici davranışı tanımlanmış ve tartışılmıştır. Deneysel sonuçlarına g¼re, elik liflerle g¼çlendirilmiř GB kirişler, referans kirişlere kıyasla çatlama direnci, servis kolaylığı ve s¼neklik açısından b¼y¼k gelişme g¼stermiřtir. elik lif içermeyen GB kirişi gevrek bir şekilde kırılmaya uğrarken, elik lif ile g¼çlendirilmiř olanlar s¼nek bir kırılmaya maruz kalmıştır. GB kirişlerinin yük kapasitesi, %0.75 hacim oranına kadar elik liflerin kullanılması ile artış g¼stermiřtir. Lif oranının %1.5'e çıkarılması, GB'nin işlenebilirliğini d¼ř¼rmesi nedeniyle eğilme davranışında bir bozulma g¼stermiřtir. Lif uzunluğunun 60 mm'ye kadar artması, erken lif kırılması nedeniyle GB kirişlerin moment kapasitesini iyileştirmemiştir. Test edilen kirişlerin yük-eğilme eğrisini, ¼ng¼r¼len ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir korelasyon ile tahmin etmek için analitik bir prosed¼r ¼nerilmiřtir.

Gunasekara ve arkadaşları [66], Avustralya'daki elektrik santrallerinden gelen ¼ farklı d¼ř¼k kalsiyum oranlı uçucu k¼lden ¼retilen geopolimer betondaki donatı korozyonunu araştırmıştır. Klor¼rde (%0-5) ıslanma kuruma çevrimlere tabi tutulmuş uçucu k¼l tabanlı geopolimer betonlarda g¼m¼l¼ demirin uzun s¼reli korozyon durumu %3'l¼k NaCl'de tutulan numuneler ile birlikte incelenmiştir. Yarı h¼cre potansiyeli ve doğrusal kutuplanma direnci teknikleri, 540 g¼ne kadar olan korozyonu ¼lmek için kullanılmış ve benzer bir bağlayıcı içerikli P betonunun sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Eşdeğer P betonları ile karşılaştırıldığında, klor¼rde ıslanma kuruma çevrimlere tabi tutulmuş geopolimer numunelerinde artan korozyon seviyeleri g¼zlemlenmiřtir. Bununla birlikte, %3'l¼k NaCl'de

tutulan numuneler söz konusu olduğunda, geopolimer beton numunelerindeki donatı PÇ betonundan daha düşük korozyon seviyeleri göstermiştir.

Klorürde daha yüksek korozyon oranı, daha yüksek bir Cl-/OH- oranı ile geopolimer numunelerinde daha düşük bir pH'a bağlanmıştır. %3'lük NaCl'de tutulan numunelerde, jel matrisinde üç boyutlu N-A-S-H ve C-A-S-H çapraz bağının oluşumu, klorür difüzyonunu inşaat demiri derinliğine indirgemekte, bu da PÇ betonuna kıyasla daha düşük bir korozyon oranının gözlemlenmesini sağlamıştır.

Khan ve arkadaşları [67], oda koşullarında kürlenmiş yüksek dayanımlı yeni bir geopolimer malzemenin ve lif takviyeli geopolimer kompozitlerin (LTGK) dinamik çekme özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Geopolimerler doğal olarak gevrek olduklarından, geopolimer matrisini güçlendirmek için hibrit çelik-polietilen kombinasyonu ve iki farklı lif hacim oranında kancalı uçlu ve spiral şekilli çelik liflerin yeni eşit oranda karışımı kullanılmıştır. Yarı-statik yarmada çekme testleri 300 kN'lık bir deplasman kontrollü Shimadzu test makinesi kullanılarak gerçekleştirilirken, dinamik yarmada çekme testlerini yapmak için değiştirilmiş bir Ø100 mm'lik bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu aparatı kullanılmıştır. Kırılma ilerleme süreçlerini ve farklı LTGK tiplerinin çatlak yayılmasını yakalamak için yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Yarı-statik yarmada çekme testleri sonuçları, güçlendirilmemiş geopolimerin minimum çekme şekil değiştirmesi kapasitesi taşıdığını göstermektedir. Çelik lif ve hibrit çelik-polietilen lif takviyesiyle LTGK numunelerinin enerji emme kabiliyeti önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Dinamik testler, tüm kompozitler için güçlü şekilde değişime hızı duyarlılığı ve belirgin çekme dayanımı artışlarını ortaya koymaktadır, ancak takviye edilmemiş geopolimer numuneleri, düşünülen test aralığı içindeki şekilde değişime hızı etkisine daha duyarlı olmuştur. Test verileri ve modifiye edilmiş CEB yönetmeliği arasındaki bir karşılaştırma yapıldığında, geopolimerler için dinamik artış faktörü ilişkisinin kurulmasında kod formüllerinin uygun olmadığını görülmüştür. Test verilerine dayanarak, güçlendirilmemiş ve farklı tipteki numuneleri için ampirik dinamik artış faktörü ilişkileri önerilmiştir. Aynı zamanda görüntü analizleriyle, spiral çelik liflerin geopolimer matris ile mükemmel bir şekilde bağlanmasının, malzemenin bütünlüğünü korumak için uygun şekilde polietilen liflerle tamamlandığı belirtilmektedir [68], [69].

Yapılan çalışmaların bazıları ısı kürü bazıları ise ortam sıcaklığında kür edilmiştir. Yapılacak çalışmada, Geopolimer betonlarda Portland çimentolu betonlar gibi ısı kürsüz ortam sıcaklığında kür edilecektir. Bunun amacı, Geopolimer betonların binalarda kullanımını teşvik etmektir.

Çalışma kapsamında no I ve no II agregaları, kum, kırma kum, su, cüruf, uçucu kül, silis dumanı, alkali aktivatörler (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), akışkanlaştırıcı malzemeler kullanarak aynı alkali aktivatör/bağlayıcı oranına sahip üç ayrı geopolimer beton üretilecektir. Deney kapsamında 150x150x150 mm'lik küp numuneler üretilecektir.

Geopolimer küp numuneleri 28., 56., ve 90. günlerinde basınç dayanım testlerine tabii tutulacaktır. Ayrıca numuneler 28. gün dayanım kazandıktan sonra Geopolimer betonların durabilite performansını incelemek için 5% sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılacaktır. Sülfürik asit etkisi sonucu küp numunelerin 56. ve 90. günlerde basınç dayanım testlerine tabii tutularak dayanımlarının, ağırlık kayıplarının ve durabilitelelerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmamızdaki asıl hedef; yapılan çalışmalar neticesinde 3 farklı Geopolimer betonların dayanım ve durabilite performanslarının %5 sülfürik asit etkisinde incelenmesi ve Geopolimer betonların yapılarda kullanımı için Geopolimer betonların standartlaşmasına katkıda bulunmaktır.

### 3. DENEY METODU

Bu kısımda üretilen Geopolimer beton malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan alkali aktivatörler, Geopolimer beton yapımında kullanılan bağlayıcılar, üretilen Geopolimer betonların kür işlemleri ve Geopolimer beton numuneler üzerinde yapılan mekanik ve durabilite deneyleri hakkında kapsamlı bilgi verilecektir.

#### 3.1. Malzeme Özellikleri

##### 3.1.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek fırın cürufu

Öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu demir-çelik fabrikalarının demir üretimi neticesinde ortaya çıkan bir yan üründür. Öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu, içeriğinde kalsiyum silikat ve alümina silikat bulunan, pürüzsüz ve granüllü yapıda olan ametal bir malzemedir. İlgili atık malzemenin beton yapımında kullanılması, hem atık malzemelerin değerlendirilerek ekonomik yönden ülkemize fayda sağlaması hem de atık malzemelerin kullanılmasıyla çevre kirliliğinin önlenmesi bakımından çok önemlidir. Bu çalışma ve deneylerde kullanılan öğütülmüş granule yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal bileşeni Çizelge 1’de belirtilmiştir ve kullanılan yüksek fırın cürufu ise Şekil 2’de gösterilmiştir. Öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu Bolu çimento tarafından Ereğli demir-çelik tesisinden temin edilmiştir.

Çizelge 1 Öğütülmüş Granüle Yüksek fırın cürufu kimyasal ve fiziksel özelliği

Kimyasal ve Fiziksel analizler	Sonuç (%)
Na <sub>2</sub> O	0,84
SiO <sub>2</sub>	37,97
Cl	0,0150
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,27
CaO	37,92
MgO	5,64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,16
K <sub>2</sub> O	0,56
SO <sub>3</sub>	0,23

Mn2O3	0,55
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,95
S	0,78
TiO2	0,66
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	5131
Kızdırma kaybı	0,01



Şekil 2 Deneyleerde kullanılan yüksek fırın cürufu

### 3.1.2. Silis Dumanı

Mikrosilika veya silis dumanı, genellikle düzgün pürüzsüz yüzeyi olan, küresel ve camsı özelliklerine sahip ve yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içeren ince daneli bir malzemedir. Bu çalışma ve deneyleerde kullanılan silis dumanının fiziksel ve kimyasal bileşenleri Çizelge 2’de verilmiştir ve kullanılan silis dumanı Şekil 3’te gösterilmiştir. Yoğunlaştırılmış (densified) silis dumanı Elkem’den tedarik edilmiştir.



Çizelge 2 Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özelliği

Kimyasal analiz	Sonuçlar (%)
SiO <sub>2</sub>	90,21
MgO	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
CaO	-
SO <sub>3</sub>	0,35
K <sub>2</sub> O	0,85
Na <sub>2</sub> O	0,45
Kızdırma kaybı	2,87
Cl <sup>-</sup>	0,0247
Serbest CaO	0,03
Özgül Ağırlık	2,32



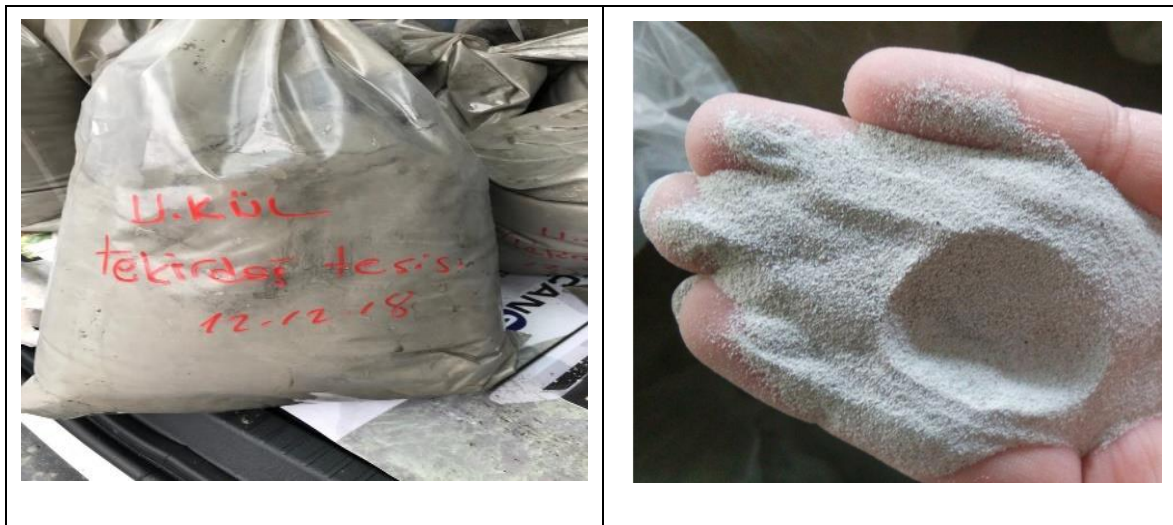
Şekil 3 Deneylerde kullanılan silis dumanı

### 3.1.3. F-Tipi Uçucu kül

Uçucu kül, koyu gri renkte olan, çok ince taneli, çoğunlukla küresel ve camsı yapıya sahip olan bir malzemedir. Bu çalışma ve deneylerde kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal bileşenler Çizelge 3'te belirtilmiştir ve deneylerde kullanılan uçucu kül Şekil 4'te gösterilmiştir. İçerdiği CaO oranı ~2 (%) civarında olduğundan uçucu kül sınıfı olarak F-tipi uçucu kül sınıfına girmektedir.

Çizelge 3 Uçucu küle ait fiziksel özellikler ve kimyasal bileşenler

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



Şekil 4 Deneyde kullanılan uçucu kül

### 3.1.4. Agregaların Özellikleri

Deneyleerde kullanılan agregalar boyutlarına göre kum, kırma kum, ve çakıl veya kırmataş olarak ifade edilmektedir. İnce agregalar 4 mm'den daha küçük olan agregalardır ve iri agregalar da 4 mm ile 22 mm arasında değişmektedir. Bu çalışma ve deneyleerde kullanılan agregaya ait fiziksel ve kimyasal bileşenler Çizelge 4'de ve Şekil 5'de belirtilmiştir.

Kaba agreganın dane büyüklüğü 4 – 11 mm arasında olmaktadır. İnce agreganın dane büyüklüğü ise 4mm altındadır. Çizelge 4'te kullanılan iri agregaların (4 mm – 22 mm) mekanik ve fiziksel özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 4 Agregaların kimyasal ve fiziksel özelliği

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



Şekil 5 Deneyleerde kullanılan agregalar

### 3.1.5. Alkali Solüsyonlar

Yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş granule yüksek fırın cürufunun dayanım kazanması için alkali solüsyonu olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikattan ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) oluşan çözelti kullanılmıştır. Sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) solüsyonunun özellikleri Çizelge 5'te verilmiştir. Sodyum silikat sıvı solüsyonu yerel bir kimya marketinden sıvı olarak temin edilmiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) ise %98 saflıkta katı olarak yerel bir kimya marketinden temin edilmiştir. Yapılan bir çalışmada 14M sodyum hidroksit çözeltisinin kimyasal etkilere karşı en zayıf sodyum hidroksit konsantrasyon miktarı olduğu belirtilmiştir [68]. Bu sebepten dolayı biz de yaptığımız çalışmada Geopolimer betonların kimyasal etkisine karşı durabilitesini incelediğimizden dolayı kimyasal etkilere karşı en zayıf sodyum hidroksit konsantrasyon oranı olan 14M NaOH çalışmamızda kullanılmıştır. Sodyum hidroksit katısı 14 Molarite olacak şekilde su içinde çözülmüştür. Yapılan başka bir çalışmada sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının ekonomik sebeplerden dolayı 1.5 ile 2.5 arasında kullanılması gerektiği belirtilmiştir [69]. Yaptığımız çalışmada ise sodyum silikat/ sodyum hidroksit ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) oranı olarak 2.5 kullanılmıştır. Temin edilen sodyum silikat sıvısı ile 14M olarak hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisi birleştirilerek karışımda alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Şekil 6'da 14 M sodyum hidroksit çözeltisinin laboratuvar ortamında hazırlanması gösterilmiştir. 14M oranı için belirli bir miktar kaba konulan suya yavaş yavaş sodyum hidroksit katısı eklenerek yüksek hızda dönerken çalışan bir mikser yardımıyla katı olan sodyum hidroksitin su içinde çözünmesi sağlanmıştır.

Çizelge 5 Sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özelliği

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



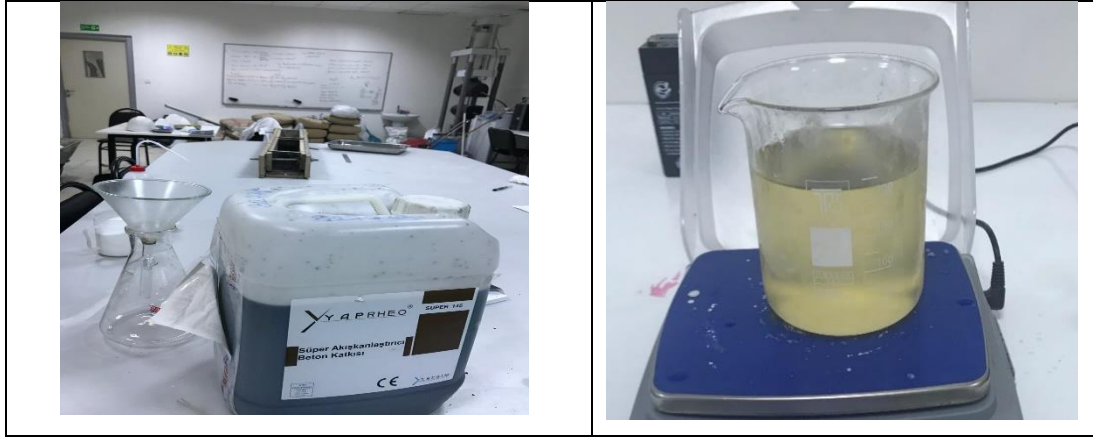
Şekil 6 14M sodyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması

### 3.1.6. Süper Akışkanlaştırıcı

Yapılan çalışmada, Geopolimer betonların S4 kıvamı elde edilebilmesi için naftalin sülfonat esaslı bir kimyasal katkı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan katkı miktarları beton tasarım tablosunda gösterilmiştir. Kullanılan katkı iki aşamada miksere dökülmüştür. İlk aşamada kullanılacak katkının yarısı alkali aktivatörlerin içine katılıp karıştırılmış, diğer yarısı da ikinci aşamada beton mikserine ilave edilmiştir. Deneylerde kullanılan naftalin sülfonat esaslı kimyasal katkının özellikleri Çizelge 6’da verilmiştir ve kimyasal katkı Şekil 7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6 Süper Akışkanlaştırıcı Özelliği

Özellikleri	Kimyasal katkının bilgileri
Ürün ismi	Yaprheo Super 145
Özgül ağırlık	1,069 g/cm <sup>3</sup>
Durum	Sıvı
Rengi	Opak

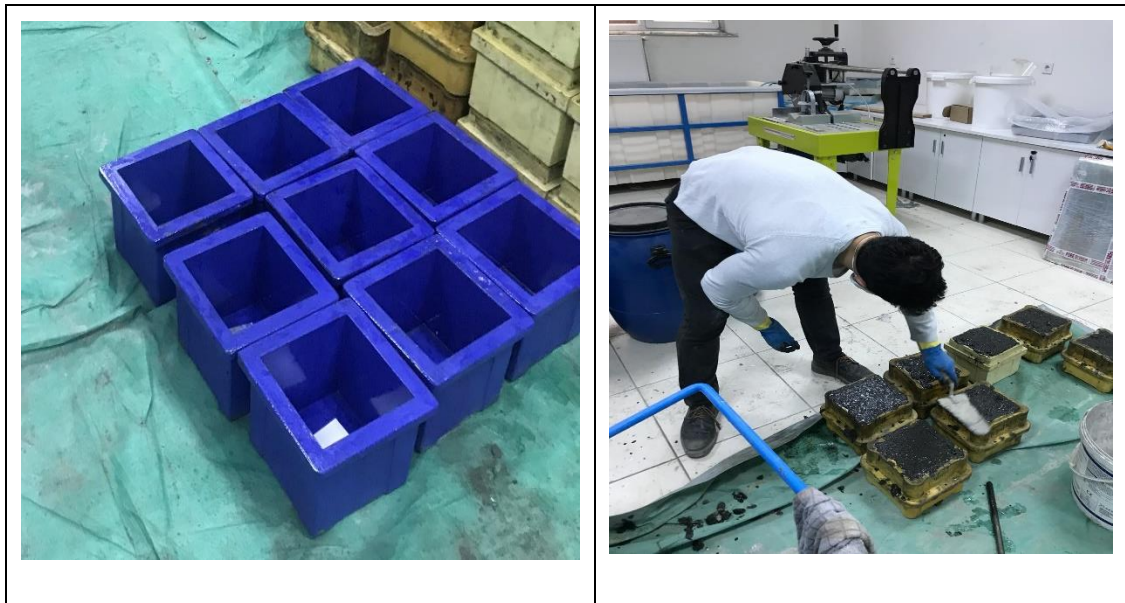


Şekil 7 Deneyde kullanılan kimyasal katkı

## 3.2. Deney Metodu

### 3.2.1 Deneyde Kullanılan Kalıplar

Çalışmada, kübik kalıplar (150x150x150) mm ebatlarında kullanılmış olup Şekil 8’de gösterilmiştir. Taze beton dökümü öncesinde kullanılacak kalıplar temizlenip hazırlanmış, beton dökümünden önce bütün küp kalıp numunelerin içi yağlanmıştır. Numunelerin kalıptan kolayca çıkarılmasını sağlamak amacıyla, kalıpların en alt kısmında bulunan delikler kalın kağıtlarla örtülerek deliklerin beton ile kapanması engellenmiştir

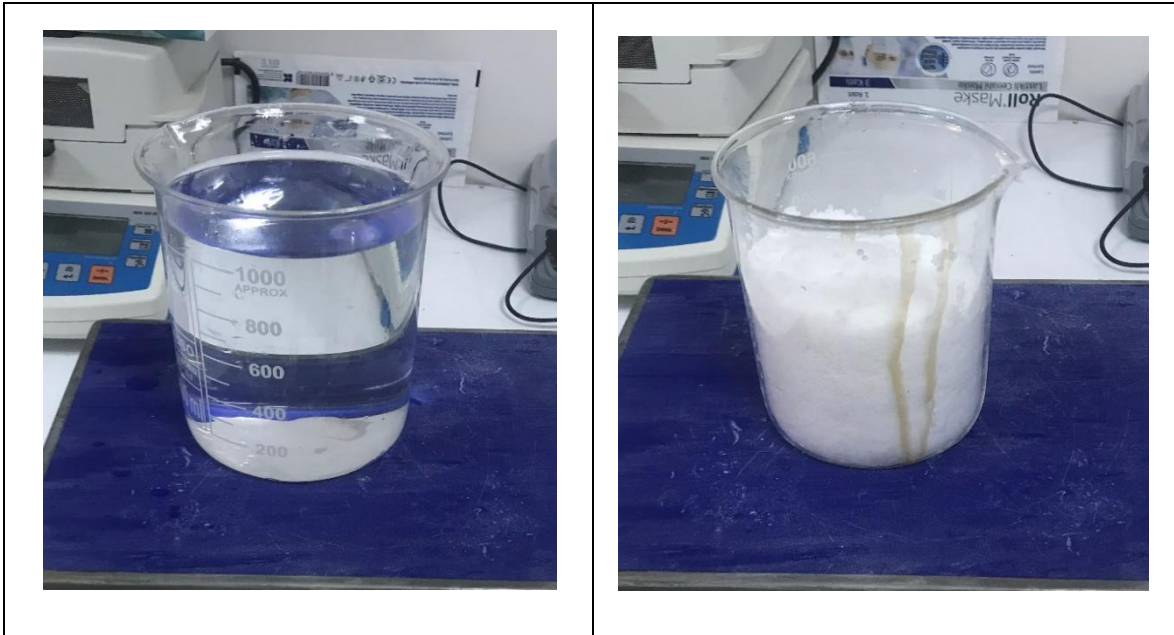




Şekil 8 Deneyde kullanılan kalıplar ve uygulaması

### 3.2.2. Alkali Solüsyon Hazırlığı

Yapılan çalışmada kullanılacak olan alkali aktivatörler; sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Bu karışımda 1482 gr 14 M NaOH çözeltisinin elde edilmesi amacıyla 957 gr su ile 525 gr NaOH karıştırılarak kullanılmıştır. Bu kapsamda hazırlanan 14 M NaOH çözeltisi ısı açığa çıkardığından dolayı, beton dökülmeden önce bu çözelti 15 dk soğumaya bırakılmıştır.



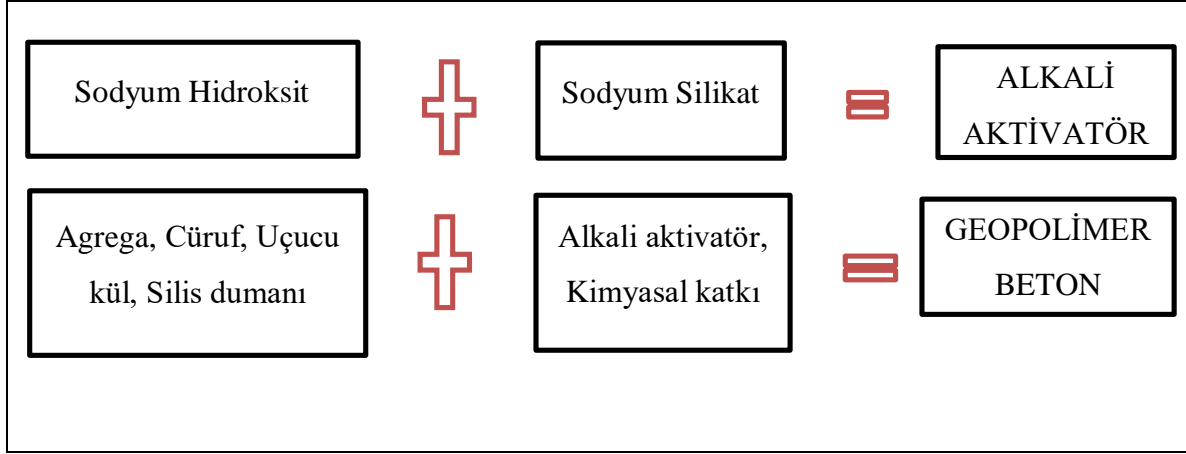


Şekil 9 Alkali aktivatör hazırlanması ve uygulaması

### 3.2.3. Beton Karışımı Yöntemi

Üretilen Geopolimer betonlar; agrega ve çimento yerine bağlayıcılığın sağlanabilmesi için kullanılan atık (cüruf, silis dumanı, uçucu kül) malzemeler ve alkali aktivatörler (sodyum silikat ve sodyum hidroksit) kullanılarak elde edilen yeni nesil çevreci beton tipidir. Şekil 10'da geopolimer betonların hazırlanma süreci gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen bütün numunelerde %5 oranında silis dumanı olacaktır. Çok ince malzeme olması nedeniyle silis dumanının betonun geçirimsizlik özelliğini artıracığı düşünülmektedir. %5 silis dumanı kullanılarak üç farklı Geopolimer beton üretilecektir. Bunlardan ilki, %95 oranında öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu ve %5 silis dumanı içeren Geopolimer betonlar üretilecektir. Bu çalışma kapsamında bu Geopolimer betonların kısaltması olarak ise 95C5SF kullanılacaktır. İkinci farklı Geopolimer beton olarak ise %65 oranında öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu + % 30 oranında F-tipi uçucu kül + % 5 oranında silis dumanı içeren Geopolimer beton üretilecektir. Bu tip Geopolimer betonların kısaltması olarak ise 65C30U5SF kullanılacaktır. Diğer Geopolimer beton ise %15 oranında öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu + % 80 oranında F-tipi uçucu kül + % 5 oranında silis dumanı içeren Geopolimer beton üretilecektir. Elde edilen 3.tip Geopolimer betonların kısaltması olarak ise 15C80U5SF kullanılacaktır. Elde edilen Geopolimer betonların mekaniksel ve %5 sülfürik asit etkisi altında durabilite performansı incelenecektir.





Şekil 10 Geopolimer beton karışım süreci

Çizelge 7. 95C5SF içeren Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m <sup>3</sup> )
İri agrega	No I	560
	No II	560
İnce Agrega	Kum	373
	Kırma Kum	373
Yüksek fırın cürufu		342
Uçucu Kül		-
Silis Dumanı		18
Kimyasal katkı		11.72
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		115.7
NaOH		46.3
İlave Su		25

Çizelge 8. 65C30U5SF içeren Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m <sup>3</sup> )
İri agrega	No I	560
	No II	560
İnce Agrega	Kum	373
	Kırma Kum	373
Yüksek fırın cürufu		234
Uçucu Kül		108
Silis Dumanı		18
Kimyasal katkı		10.16
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		115.7
NaOH		46.3
İlave Su		25

Çizelge 9. 15C80U5SF içeren Geopolimer betonların üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m <sup>3</sup> )
İri agrega	No I	560
	No II	560
İnce Agrega	Kum	373
	Kırma Kum	373
Yüksek fırın cürufu		54
Uçucu Kül		288
Silis Dumanı		18
Kimyasal katkı		7.03
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		115.7
NaOH		46.3
İlave Su		25

### 3.2.4. Geopolimer numune üretimi

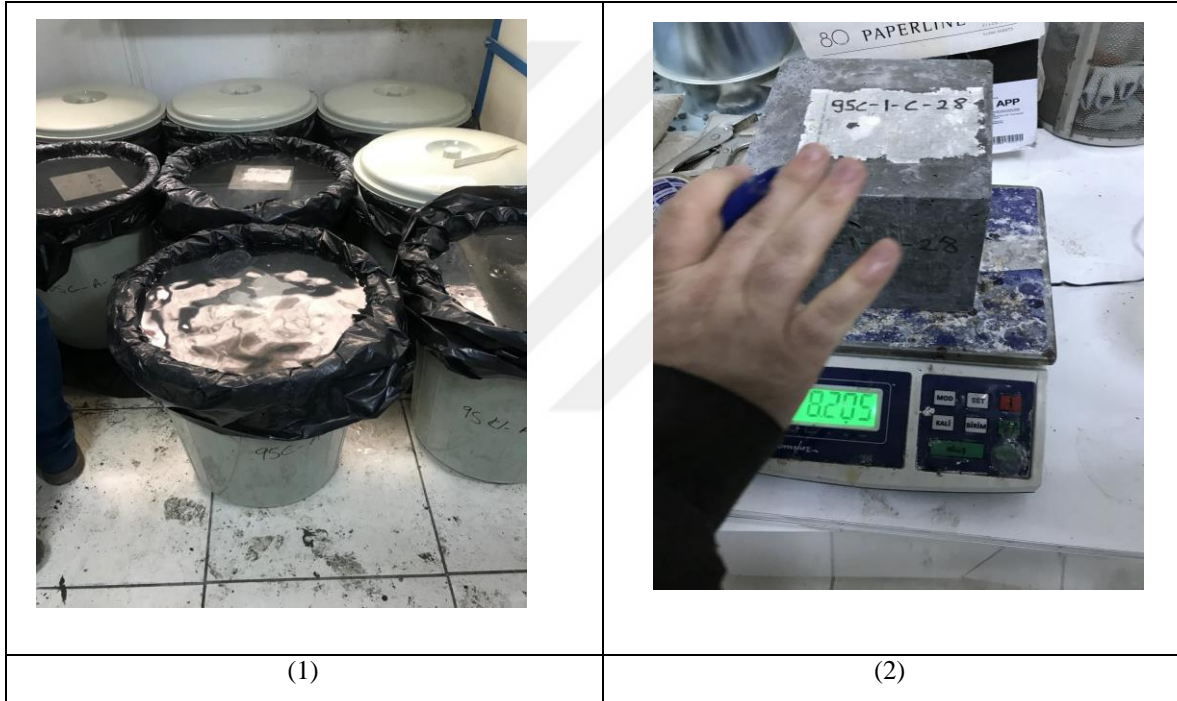
Normal beton üretiminde kullanılan standart karıştırma modeline benzer üretim tekniği ile Geopolimer betonlarımız İstanbul Gelişim Üniversitesi laboratuvarında bulunan beton karışım makinesi (mikser) kullanılarak üretilmiştir. Agregalar beton içinde kullanılan en ucuz malzeme olmasından dolayı beton içerisinde en çok kullanılan malzemedir. Kullanılan agregalar yüzeyi suya doymuş olarak kullanılırlar. Beton mikserinin içine en büyük boyutlu agregalar en altta, en küçük boyutlu agregalar ise en üstte olacak şekilde sırasıyla belirlenen miktarlarda doldurulurlar. Daha sonra ise üretilecek beton tipine bağlı olarak farklı bağlayıcı malzemeler (silis dumanı, uçucu kül ve/veya cüruf) beton mikserinin içine yerleştirilir. Agregaların ve bağlayıcı malzemelerin homojen olarak karışması için kuru malzemeler mikserin içinde 2 dakika boyunca karıştırılır. Sonra, hazırlanan alkali aktivatörler ve kimyasal katkının yarısı (sodyum silikat, sodyum hidroksit ve akışkanlaştırıcı katkının yarısı) bir kovanın içinde karıştırılarak, beton mikserine ilave edilir. Elde edilen karışım 2 dakika kadar homojen karışım olması için karıştırılır. Daha sonra ilave su ve kalan akışkanlaştırıcının yarısı da son olarak mikserde ilave edilerek, karışım 2 dakika daha karıştırılır. Toplam 6 dakika boyunca Geopolimer beton homojen olması için mikserde karıştırılmıştır. Beton numuneler 150x150x150 mm küp kalıpların yarısına kadar doldurulup titreşim işlemi uygulandıktan sonra (hava boşluklarını azaltmak için) diğer yarısı da doldurularak tekrar titreşime maruz bırakılır. Beton döküm işlemi sonrasında kalıplar, şekillerde görüldüğü gibi hava ile temasa geçmemesi ve alkali çözeltisinin buharlaşmasının engellenmesi için yüzeyi mastarlanarak plastik torbalar ile kapatılmış ve ortam sıcaklığına bırakılmıştır. Üretilen 3 farklı Geopolimer betonlardan elde edilen numuneler 28., 56., ve 120. günlere kadar ortam sıcaklığında kür edilerek hedeflenen günlerde basınç dayanım testlerine maruz bırakılmıştır. Üretilen numunelerden bazıları ise 28. gün ortam sıcaklığında kür edildikten sonra %5 sülfürik asit ortamına maruz bırakılmıştır. Bu numuneler 56. günde (28 gün kür + 28 gün sülfürik asit) ve 120.günde (28 gün kür + 92 gün sülfürik asit) basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca asit etkisine maruz kalan numunelerde asit etkisinden dolayı ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Üretilen betonların karışım süreci Şekil 11'de paylaşılmıştır.

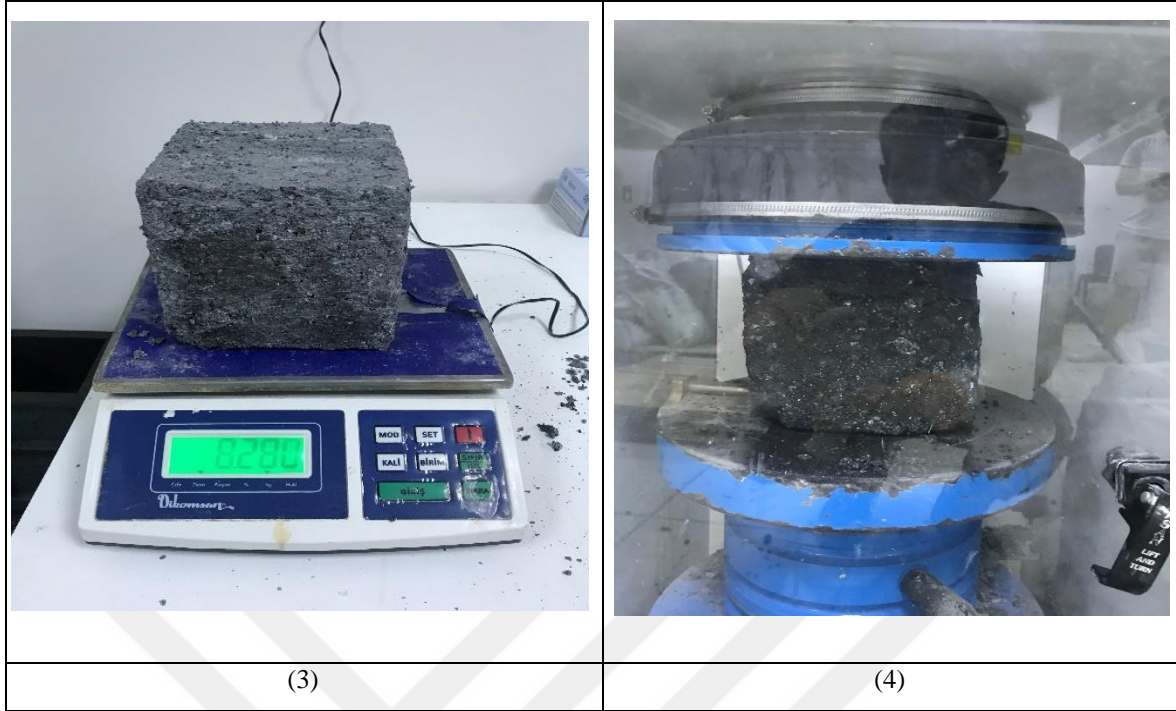


Şekil 11 Beton karışımı ve dökümü

### 3.2.5. Sülfürük asit hazırlığı

Birbirinden farklı olarak üretilen Geopolimer beton numunelerinin %5 sülfürük asit etkisinde durabilite performanslarını incelemek amacıyla %5 sülfürük asit çözeltileri hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin kovalara yerleştirilmesinin ardından kovalar küp numunelerin yüksekliğinin 5 cm üstüne kadar %5 sülfürük asit çözeltisi ile doldurulmuştur. Numunelerden bazıları 28 gün sonra bazıları ise 92 gün sonra asit çözeltilerinin içerisinde çıkarılıp deneylere başlanmadan önce numunelerin kuruması sağlanmıştır. Numunelerin kovalar içerisinde %5 sülfürük asit ortamında bekletilmesi Şekil 12’de gösterilmiştir.





Şekil 12. Numunelerin %5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilmesi, ağırlık ölçümleri ve basınç testlerinin yapımı

### 3.2.6. Ağırlıkta Meydana Gelen Değişim

Üretilen her bir numunenin başlangıç ağırlıkları (asit ortamına maruz bırakılmadan önce) 28.günde tartılarak kaydedilmiştir. Daha sonra 56. ve 120. günlerde ortam koşullarındaki numuneler ile asit ortamına maruz bırakılan numunelerin ağırlıkları kaydedilmiştir. Özellikle asit ortamından çıkan numunelerin 24 saat laboratuvar ortamında bekletilerek kuruduktan sonraki ağırlıkları kaydedilmiştir. Numunelerin farklı günlerde ve farklı ortamlarda ağırlıklarında meydana gelen değişimler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

A: Başlangıçtaki ağırlık

B: Asit etkisine maruz kalan beton ağırlığı

Ağırlık değişim yüzdesi  $= [(B-A)/A] \times 100$

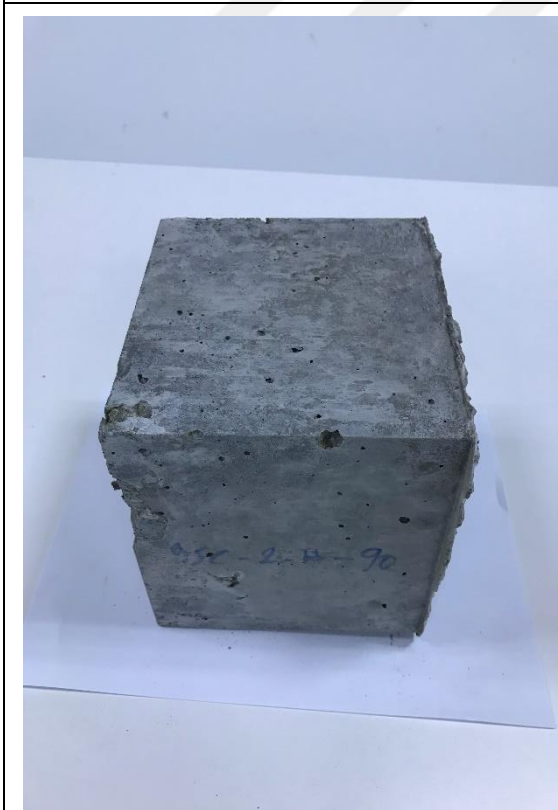
Ortam sıcaklığında bekletilen 28, 56 ve 120 günlük numuneler Şekil 13’de, asit etkisine maruz kalan numuneler ve ağırlık değişimleri ise Şekil 14’te gösterilmiştir.



(1)



(2)



(3)



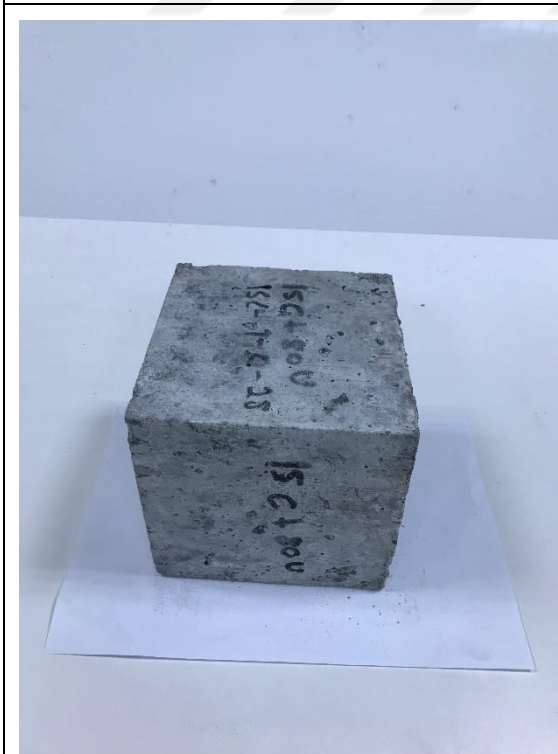
(4)



(5)



(6)

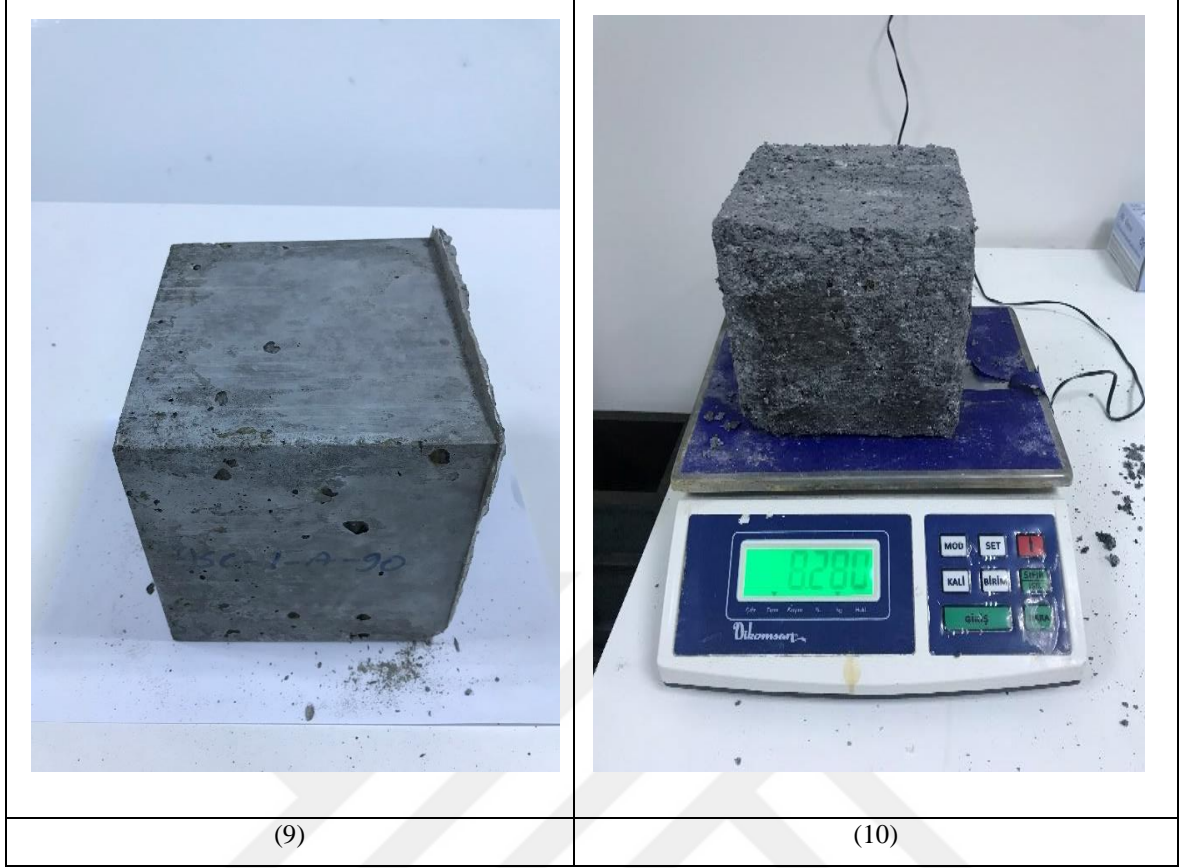


(7)

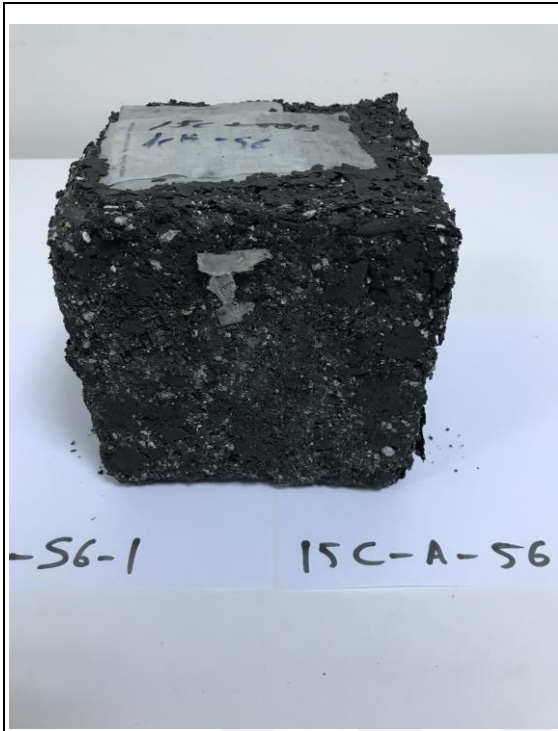


(8)

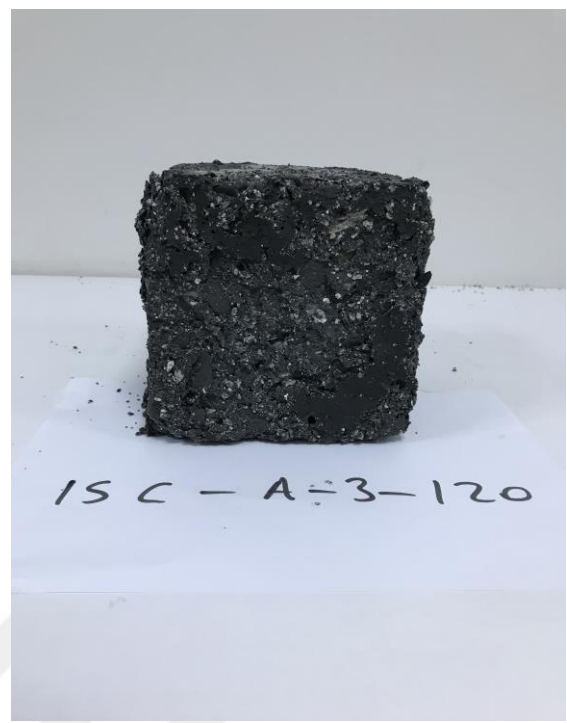




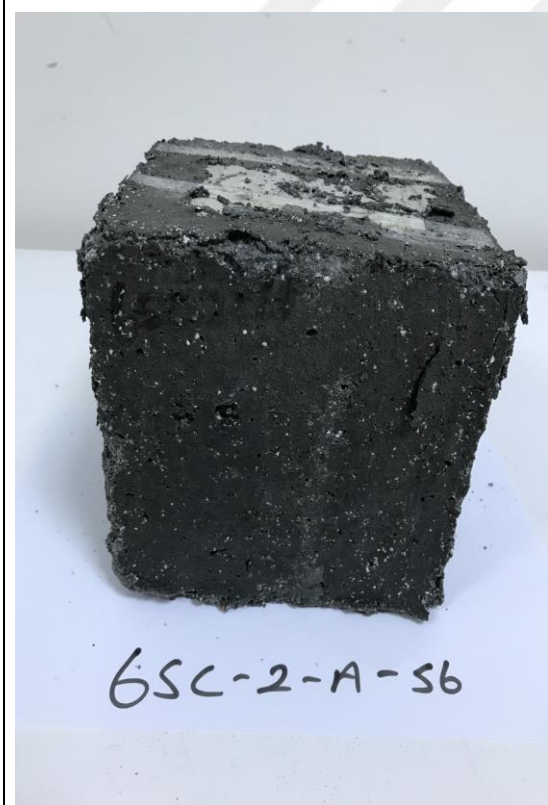
Şekil 13 Laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin yüzey fotoğrafları ve ağırlık değişimleri



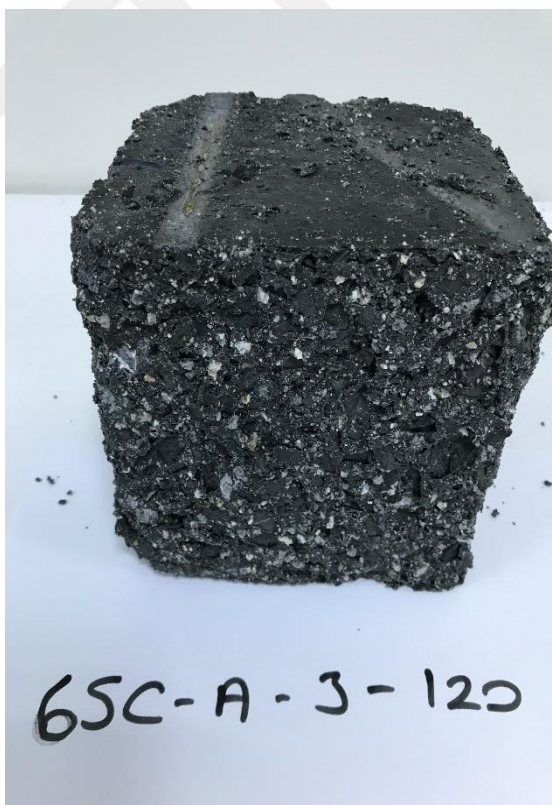
(1)



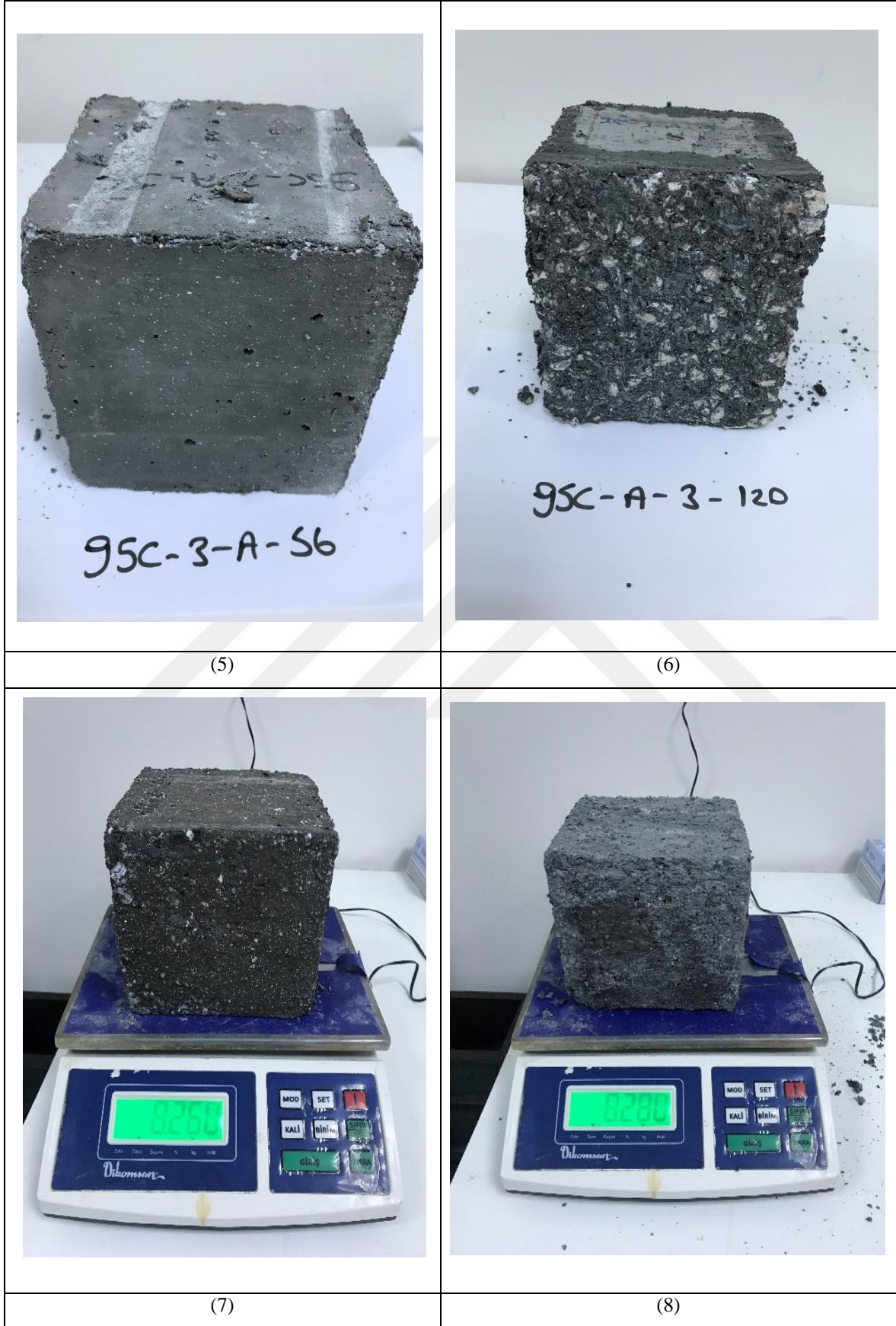
(2)



(3)



(4)



Şekil 14 Numune görüntüleri, asit etkisinde bekletilen numuneler ve ağırlık değişimleri

### 3.2.7 Basınç Dayanım Testleri

Basınç dayanım testi, betonun basınç gerilmesi altında dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılır. Teknik olarak, tek eksenli basınca maruz bırakıldığında numunenin taşıyabildiği en yüksek gerilme değerine ulaşılır. Sonuç olarak beton numunesinin dayanacağı en yüksek basınç kuvvetinin beton alanına bölünmesiyle betonun basınç dayanımı elde edilir. Genellikle birim olarak MPa veya N/mm<sup>2</sup> kullanılır. Beton numunelerde üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanım testleri AS1012.9-1999'a göre yapılmıştır, Şekil 15. Laboratuvar ve asit ortamlarında bekletilen numunelerde 28., 56., ve 120. günlerinde basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 15 Numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanım testleri

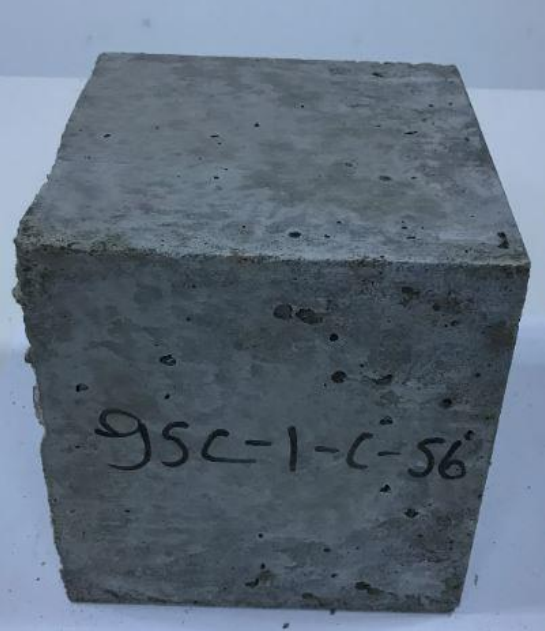

## 4. TARTIŞMA VE BULGULAR

Yapılan çalışma kapsamında %5 sülfürik asit etkisine maruz bırakılan farklı karışım oranlarıyla hazırlanan geopolimer betonların durabilite performansları incelenmiştir. Bazı numunelerin, sülfürik asite maruz kalmasıyla beton numunelerinde gerçekleşen değişimin görselleri, değişen ağırlıkları ve dayanım basınçlarının zamana bağlı değişimi araştırılmıştır. Bu bölümde %95 oranında öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu ve %5 oranında silis dumanı içeren Geopolimer betonların (95C5SF); %65 oranında öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu, %30 oranında F-tipi uçucu kül ve %5 oranında silis dumanı içeren Geopolimer betonların (65C30U5SF); ve %15 oranında öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu, %80 oranında F-tipi uçucu kül ve %5 oranında silis dumanı içeren Geopolimer betonların (15C80U5SF) mekanik ve durabilite performansı incelenmiştir.

### 4.1 Görsel İnceleme

Bu kapsamda 95C5SF, 65C30U5SF, ve 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinin laboratuvar ve 5% sülfürik asit ortamlarında 56., ve 120. günlerinde yüzeylerinde oluşan değişim Şekil 16'da gösterilmektedir. Sülfürik asit etkisindeki numunelerin dış yüzey yapısının görsel olarak incelenmesi sonucunda, betonların dış yüzeylerinde etrenjit ve alçıtaşı oluşumundan kaynaklı bozulma ve beyaz lekeler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Asit etkisine bırakılan numunelerin yüzeylerindeki erozyon, kalsiyum hidroksit ile kalsiyum monosülfoalüminatlar arasındaki kimyasal reaksiyonlar sebebiyle oluşan beyaz renkli bir alçı kristal tabakası sebebiyle oluşmaktadır. Meydana gelen alçı taşı ve etrenjit ürünleri sebebiyle beton dış yüzeyleri zayıflamakta, böylece en dış yüzeyden başlayarak numunelerde ufalanarak bağlayıcı tabakanın erozyona uğramasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak betonda kesit kaybı gözlemlenmektedir. Numunelerde oluşan kesit kayıpları ve beyaz lekelerin çok fazla miktarda olması, betonun sülfürik asitten çok fazla miktarda etkilenerek basınç dayanımlarında çok fazla azalmaya sebep olmaktadır. Şekil 16'da laboratuvar ve asit ortamına maruz bırakılan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen değişimler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Görsel olarak incelendiğinde, betonun zaman geçtikçe dış yüzeylerinde meydana gelen bozulmanın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda 120. günde betonun dış yüzeyinde asit etkisiyle meydana gelen yumuşama ve bozulma, 56. gündeki yumuşama ve bozulmaya kıyasla daha yüksektir.

Geopolimer betonlar görsel olarak incelendiğinde, Uçucu külün daha fazla olduğu betonlarda (15C80U5SF), cürufllu betonlara nazaran daha fazla kabarma ve dökülme, beton yüzeyinde ise daha fazla beyaz renkli lekeler yer almaktadır. Yüksek oranda cüruf kullanılan geopolimer betonlarda (95C5SF) ise daha seyrek dökülme ve daha az beyaz renkli lekeler bulunmaktadır. 95C5SF Geopolimer beton görsel olarak asit etkisine karşı en iyi durabiliteyi sağlamışken, 15C80U5SF Geopolimerleri ile hazırlanan betonda ise görsel değişim olarak asit etkisine karşı en olumsuz durabilite performansını göstermiştir. İçerik olarak yüksek oranda öğütülmüş granule yüksek fırın cürufu kullanılan Geopolimer betonda asit etkisinden kaynaklanan bozulmanın nedeni cüruf içeriğindeki yüksek CaO'dan kaynaklıdır. Uçucu kül kullanılan betonlarda gerçekleşen bozulmaların nedeniyse hidrate olmamış uçucu kül parçacıkları sebebiyle geçirimsizliğin yüksek olması sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca uçucu küllü betonlarda basınç dayanımının zamanla gelişmesinden ötürü erken yaşlarda sülfürik asit etkisine maruz bırakılması Geopolimer betonun basınç dayanımının gelişmesini olumsuz etkileyebilir. Kalsiyum açısından zengin olan beton numunelerinde arayüzeylerin daha iyi gelişmesinden dolayı betonda geçirimsizlik azalmıştır ve bu durum betonun kimyasal etkilere karşı durubilitelerini artırmıştır.

Oda sıcaklığında bekletilen numuneler	Asit etkisinde bekletilen numuneler
	
(a) 95C5SF- 56. Gün	(b) 95C5SF- 56. Gün



(c) 65C30U5SF- 56. Gün



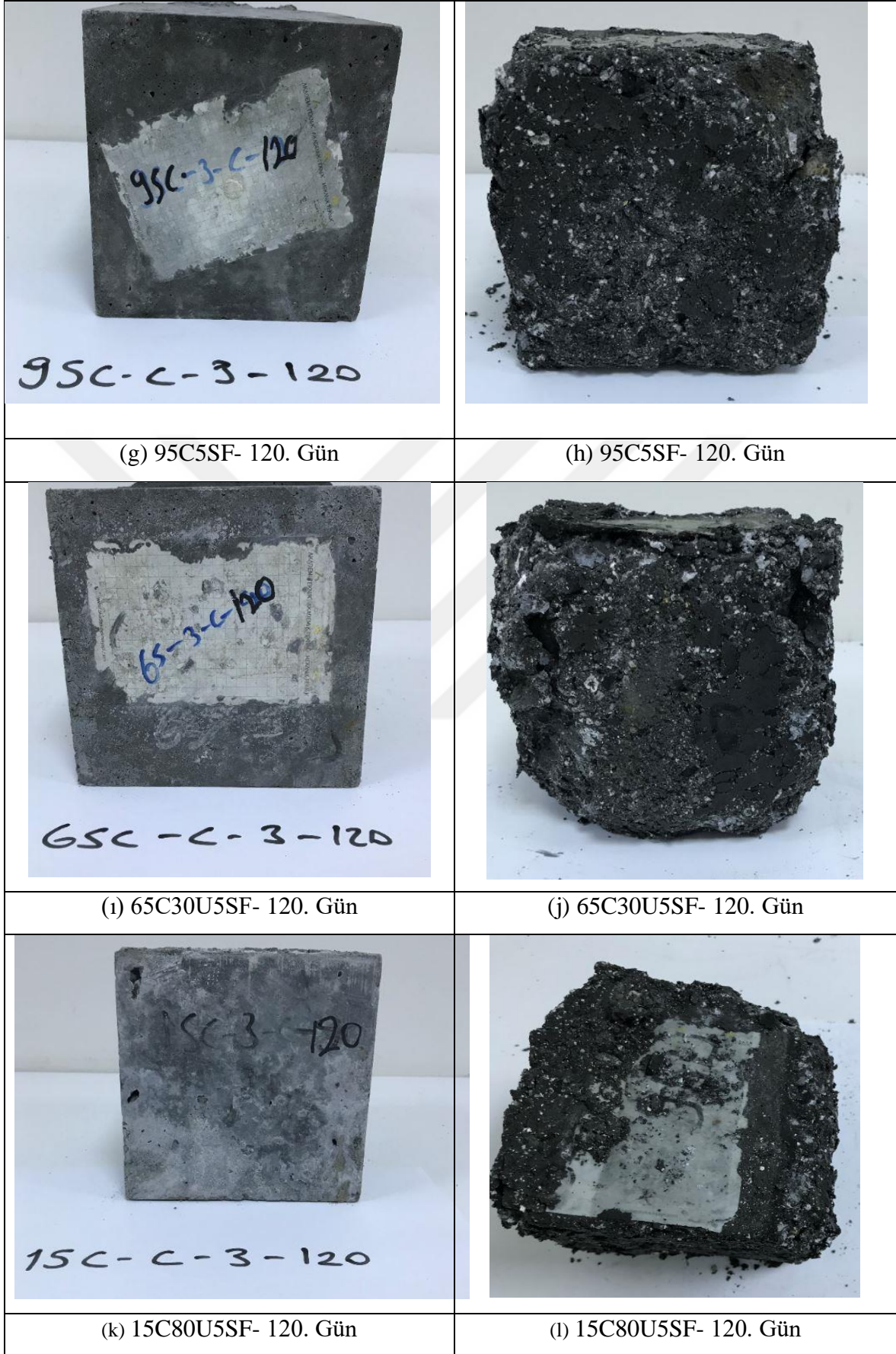
(d) 65C30U5SF- 56. Gün



(e) 15C80U5SF- 56. Gün



(f) 15C80U5SF- 56. Gün



Şekil 16 Sülfürik asite maruz bırakılan numunelerdeki yüzeysel değişimin incelenmesi



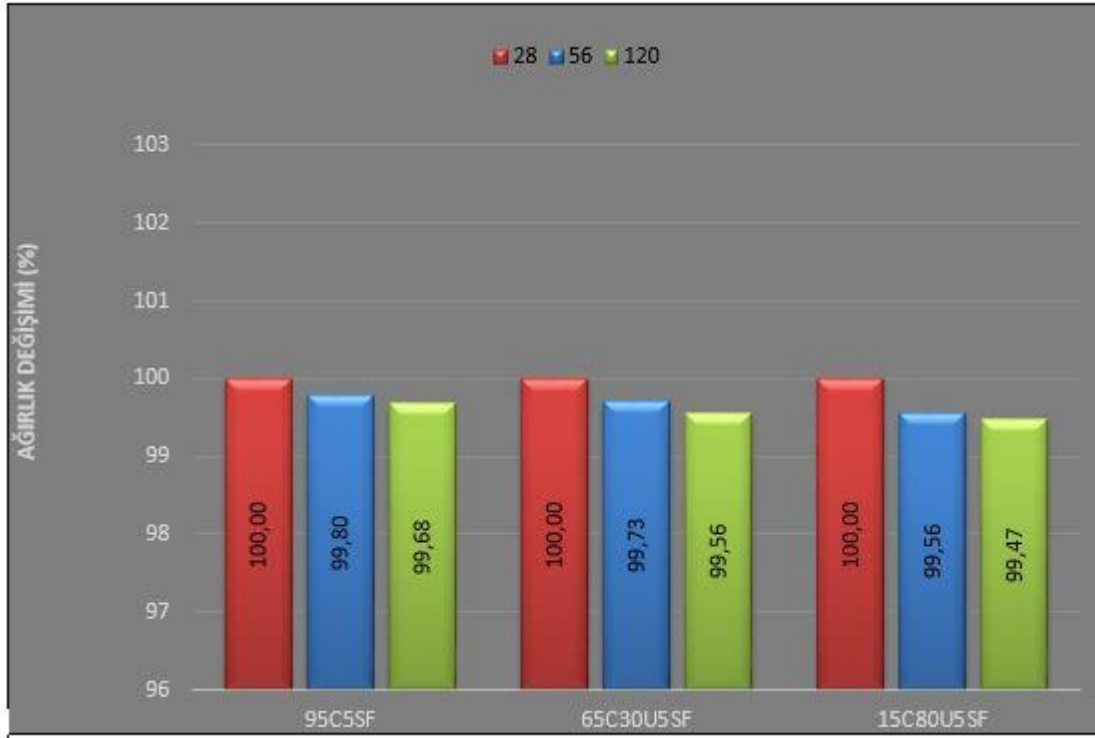
#### 4.2 Ağırlık Azalması

Çalışmada kapsamında ayrıca 95C5SF, 65C30U5SF, ve 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinin laboratuvar ve % 5 sülfürik asit ortamlarında 28., 56., ve 120. günlerinde numunelerin ağırlıklarında meydana gelen değişimler kaydedilmiş olup Şekil 17-22’de gösterilmiştir. Her bir beton numune ağırlıkları tek tek ölçülmüş olup, farklı beton tipleri için bulunan ağırlıklar, üç numune ağırlığının ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Şekil 17’de laboratuvar ortamında bırakılan numunelerin ağırlıklarında meydana gelen % değişimler gösterilmiştir. Her bir beton tipi için 28.gün ağırlıkları %100 alınmış olup, 56. ve 120. günlerde numunelerin ağırlıklarında meydana gelen değişim 28.gün ağırlıklara göre karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, devam eden geopolimerizasyon reaksiyonları sebebiyle numunelerin ağırlıklarında azalma yaşandığı gözlemlenmiştir.

95C5SF numunelerindeki ağırlık değişimine bakıldığında, 56. ve 120.günlerdeki ağırlık değişimi 28.gün ağırlık değişim sonuçlarına göre sırasıyla % 0.2 ve % 0.32 azalmıştır. Numunelerde 28 günde % 0.2 ağırlık azalması gözlemlenirken, geri kalan 56 günde ise sadece % 0.12 ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, Geopolimerizasyon reaksiyonlarının zamanla azalmasını yani geopolimerizasyon reaksiyonlarının zamanla azaldığını göstermektedir.

65C30U5SF numune sonuçlarına bakıldığında ise 56. ve 120.günlerdeki ağırlık değişimi 28.gün ağırlık değişim sonuçlarına göre sırasıyla % 0.27 ve % 0.44 azalmıştır. 95C5SF numunelerin ağırlık değişim sonuçlarında 28 günde % 0.27 ağırlık azalması gözlemlenirken, geri kalan 56 günde ise sadece % 0.17 ağırlık kaybı gözlemlenmiştir.

15C80U5SF numunelerinde ise 56. ve 120.günlerdeki ağırlık değişimi 28.gün ağırlık değişim sonuçlarına göre sırasıyla % 0.44 ve % 0.56 azalmıştır. 120.gün ağırlık değişimleri karşılaştırıldığında en fazla ağırlık değişiminin 15C80U5SF numunelerinde yani en fazla uçucu kül içeren betonlarda olduğu, en az ağırlık değişiminin ise 95C5SF numunelerinde gerçekleştiği yani en fazla cüruf içeren numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre, daha fazla uçucu kül içeren Geopolimer betonlarda geopolimerizasyon reaksiyonlarının daha fazla oluşmaya devam ettiği, cürufllu numunelerde ise Geopolimerizasyon reaksiyonlarının zamanla daha az geliştiği yani geopolimerizasyonun tamamlanmaya yakın olduğu sonucuna varılmaktadır.



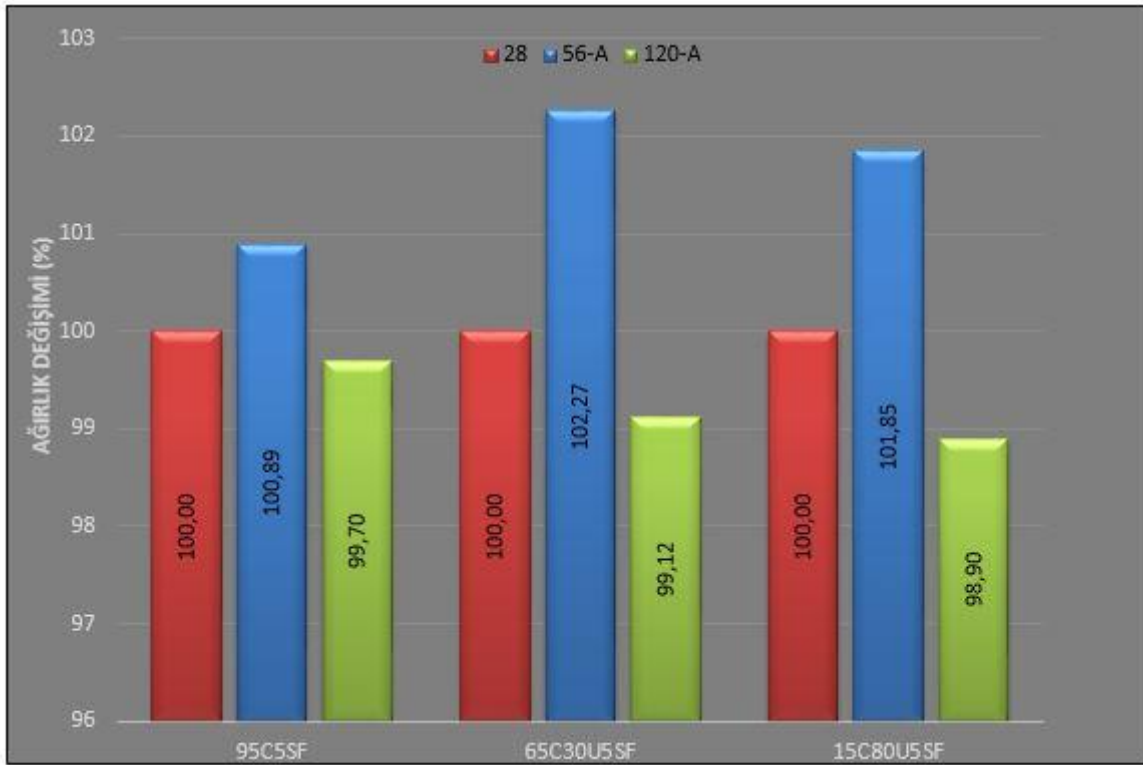
Şekil 17 Laboratuvar ortamına bırakılan numunelerin ağırlık değişimi

Şekil 18 incelendiğinde ise, her bir beton tipi için 28.gün ağırlıkları %100 alınmış olup, 56. ve 120. günlerde numunelerin asit etkisinden dolayı ağırlıklarında meydana gelen değişimler 28.gün ağırlıklarına (kontrol 28.gün-asite maruz kalmayan) göre karşılaştırılmıştır. 95C5SF numunelerindeki ağırlık değişimine bakıldığında, 56. gündeki ağırlık değişimi 28.gün ağırlık değişimine göre % 0.89 artarken, 120.gündeki ağırlık değişimi ise 28.güne göre %0.3 azalmıştır. Sonuçlara göre, asit emilimi dolayısıyla 56.günde numune ağırlığı artarken, 120.günde ise numunelerde parça dökülmesinden dolayı ağırlıklarda azalma gözlemlenmiştir.

65C30U5SF numunelerindeki ağırlık değişimine bakıldığında, 56. gündeki ağırlık değişimi 28.gün ağırlık değişimine göre % 2.27 artarken, 120.gündeki ağırlık değişimi ise 28.güne göre %0.88 azalmıştır.

15C80U5SF numunelerindeki ağırlık değişimine bakıldığında, 56. gündeki ağırlık değişimi 28.gün ağırlık değişimine göre % 1.85 artarken, 120.gündeki ağırlık değişimi ise 28.güne göre %1.10 azalmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, 120.günde (92 gün asite maruz) numunelerde en az ağırlık değişimi/en az bozulma 95C5SF numunelerinde meydana

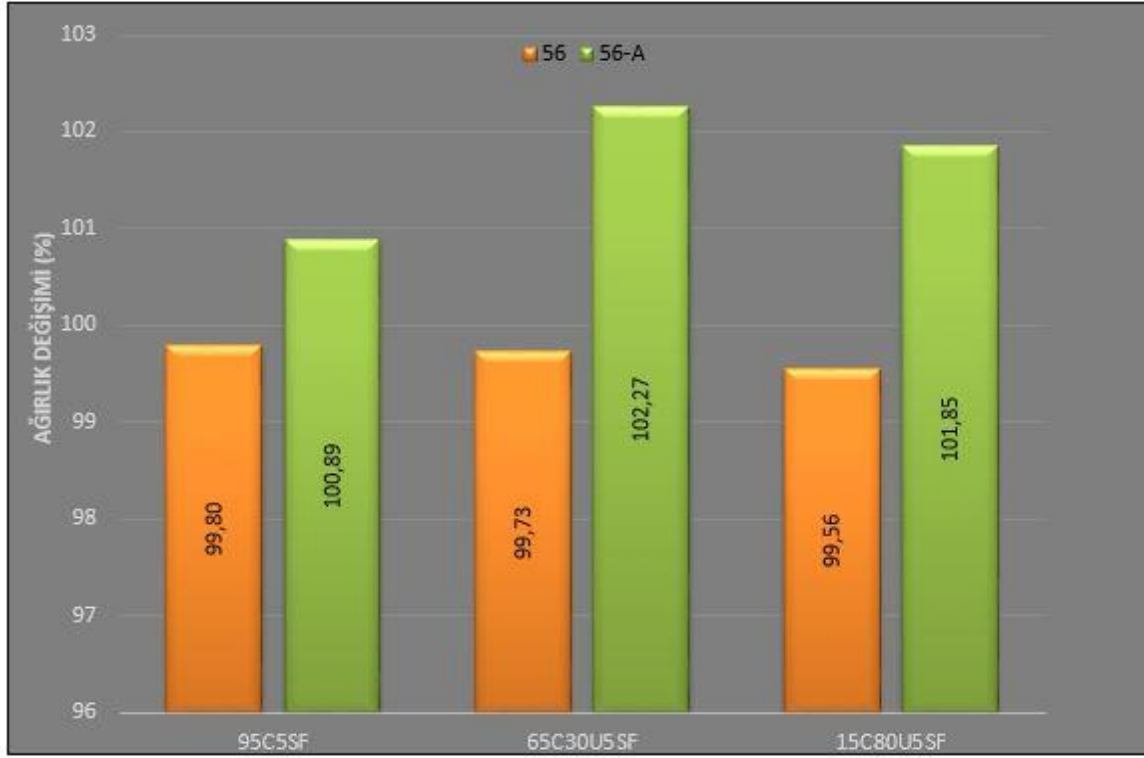
gelirken, en fazla ağırlık değişimi/en çok bozulma ise 15C80U5SF numunelerinde meydana gelmiştir. En çok bozulma, en çok uçucu kül içeren Geopolimer betonlarda gözlemlenirken, en az bozulma ise en çok cüruf içeren numunelerde gerçekleşmiştir. Cürufllu Geopolimer betonlarda daha fazla CaO bulunmasına rağmen daha az bozulma gerçekleşmesinin sebebi olarak ise, uçucu küllü Geopolimer betonların geopolimerize olmamasından ötürü boşlukların meydana gelmesi ve geçirgenliğin artması olarak açıklanabilir.



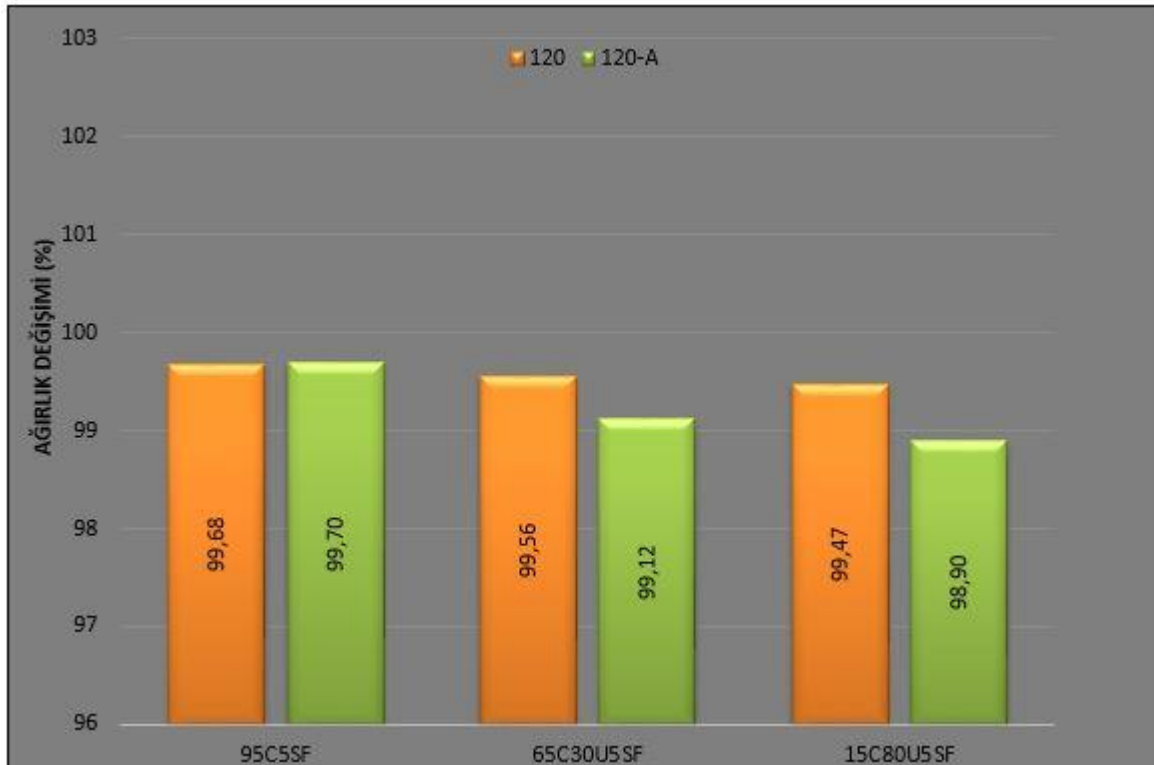
Şekil 18 Asit ortamında bırakılan numunelerdeki ağırlık değişim

Şekil 19'da hem laboratuvar koşullarında hemde asit ortamında bekletilen numunelerin 56.gün sonunda ağırlık değişimleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre, bütün Geopolimer betonlarda asit emilimi gerçekleşmesinden dolayı ağırlığının arttığı belirlenmiştir. Şekil 20'de ise hem laboratuvar koşullarında hemde asit ortamında bekletilen numunelerin 120.gün sonunda ağırlık değişimleri gösterilmiştir. 120.gün sonuçlarına göre ise, 95C5SF numunelerinde neredeyse asit etkisinden dolayı numune ağırlıklarında değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, asit emilimden dolayı meydana gelen ağırlık artışının, parça dökülmesinden kaynaklanan ağırlık azalmasına neredeyse eşit olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Diğer numunelerde ise parça dökülmesinden kaynaklanan ağırlık

kayıplarının baskın olduğu, en büyük ağırlık azalmasının 15C80U5SF numunesinde yani uçucu külün en fazla olduğu Geopolimer betonlarda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



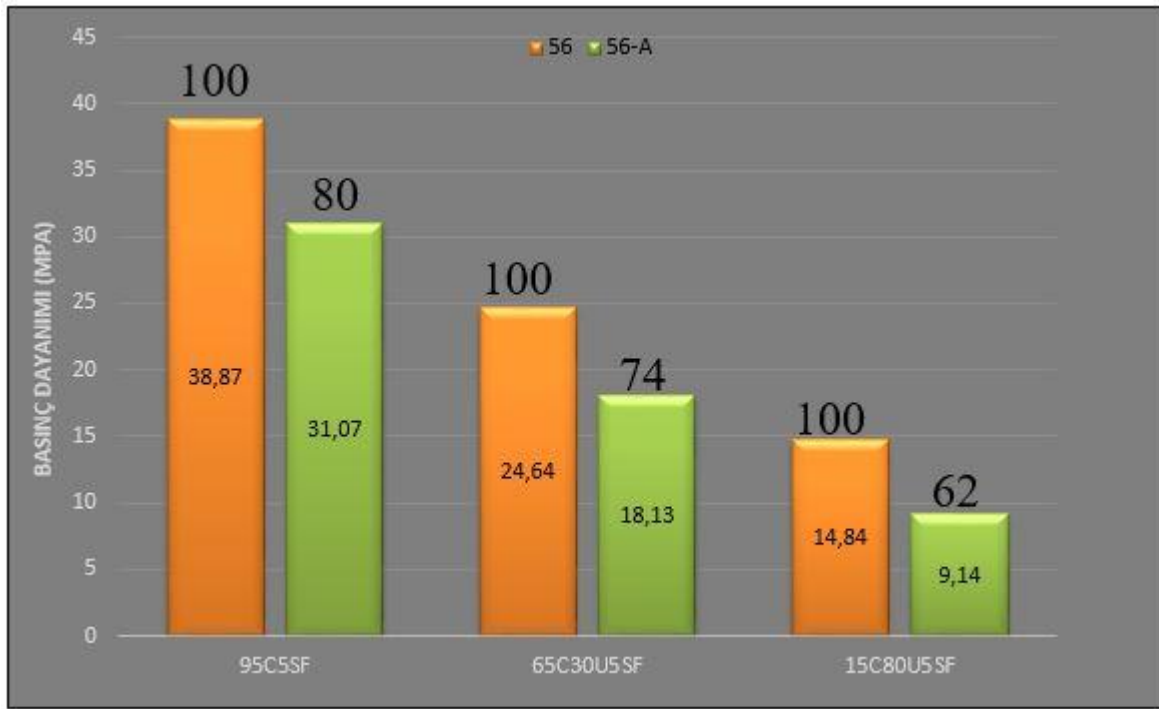
Şekil 19 Numunelerin farklı ortamlarda 56 günlük ağırlık değişimi



Şekil 20 Numunelerin farklı ortamlarda 120 günlük ağırlık değişimi

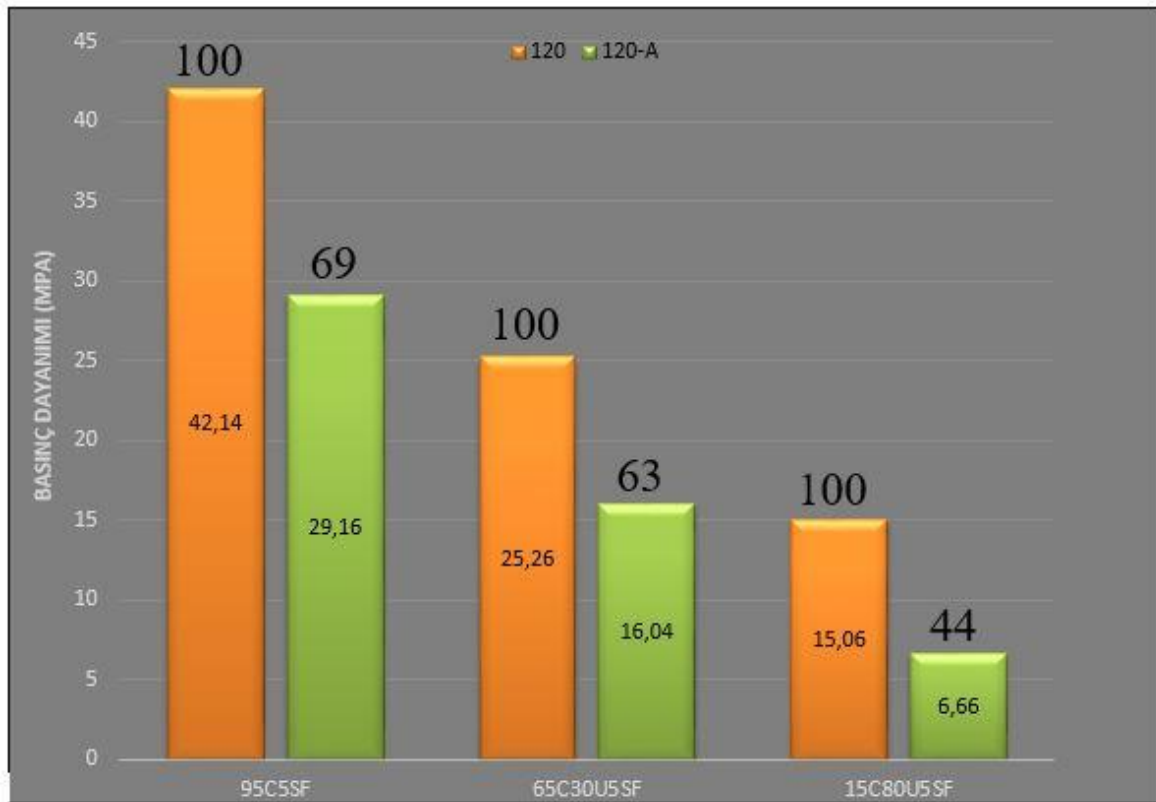
### 4.3 Basınç Dayanımı Değişimi

Yapılan çalışmada 95C5SF, 65C30U5SF, ve 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinin laboratuvar ve % 5 sülfürik asit ortamlarında 28., 56., ve 120. günlerinde numunelerin basınç dayanımındaki değişimler kaydedilmiş olup Şekil 21-24'de gösterilmiştir. Şekil 21'de 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinin 56. gündeki basınç dayanımları hem kontrol (laboratuvar-asite maruz kalmayan) hem de asit ortamlarında (56-A) karşılaştırılmıştır. 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF numunelerinin kontrol ortamındaki (56 gün kontrol) ortalama basınç dayanımları sırasıyla 38.87 MPa, 24.64 MPa, ve 14.84 MPa iken, asit ortamındaki (28 gün kontrol + 28 gün asite maruz) basınç dayanımları ise sırayla 31.07 MPa, 18.13 MPa, ve 9.14 MPa elde edilmiştir. 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF betonların asite maruz bırakılması dolayısıyla basınç dayanımlarındaki azalma sırasıyla % 20, % 26, ve %38 olmuştur. 28 gün sülfürik asit etkisi sebebiyle en fazla basınç dayanımı azalması %80 uçucu küllü üretilen Geopolimer numunelerinde meydana gelirken, asitten en az etkilenen beton ise %95 yüksek fırın çürufuyla üretilen Geopolimer beton olmuştur. %30 uçucu küllü Geopolimer betonlarda ise asit etkisinden dolayı meydana gelen dayanım azalması %26 olmuştur. Dolayısıyla bu betonların da asite karşı iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmaktadır.



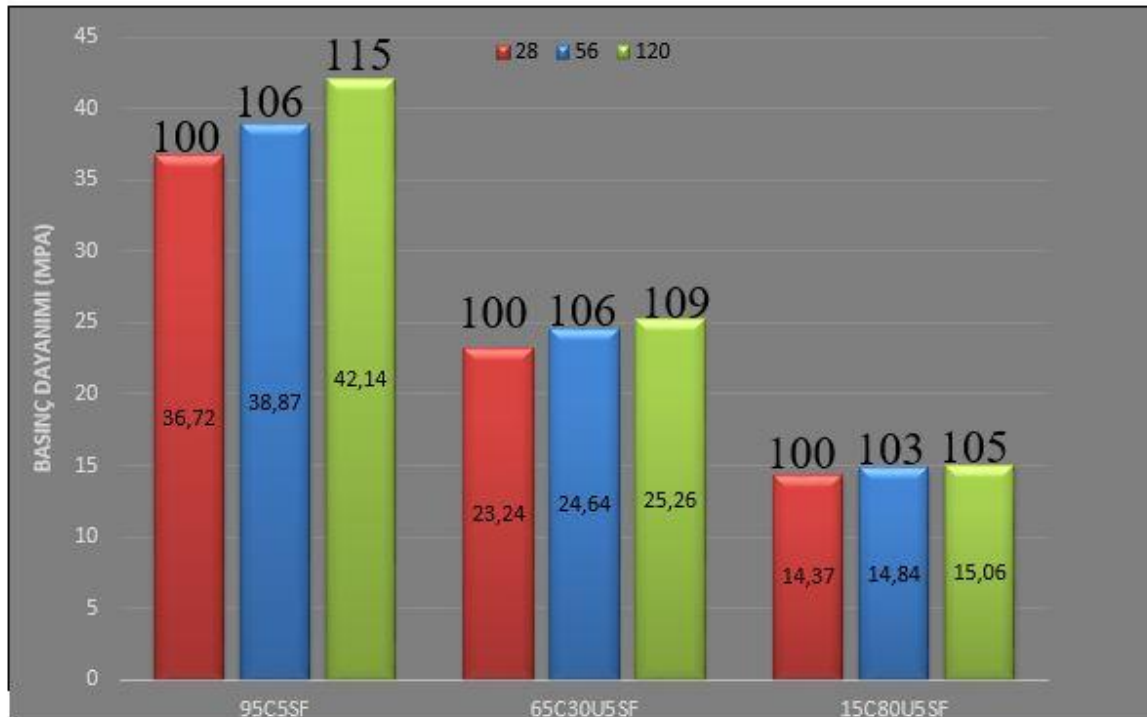
Şekil 21 Farklı ortamda bulunan numunelerin 56 günlük basınç dayanımları

Şekil 22’de ise 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinin 120. gündeki basınç dayanımları hem kontrol (laboratuvar-asite maruz kalmayan-120) hem de asit ortamlarında (120-A) karşılaştırılmıştır. 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF numunelerinin kontrol ortamındaki (120 gün kontrol) ortalama basınç dayanımları sırasıyla 42.14 MPa, 25.26 MPa, ve 15.06 MPa iken, asit ortamındaki (28 gün kontrol + 92 gün asite maruz) basınç dayanımları ise sırayla 29.16 MPa, 16.04 MPa, ve 6.64 MPa elde edilmiştir. 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF betonların asite maruz bırakılması dolayısıyla basınç dayanımlarındaki azalma sırasıyla % 31, % 37, ve %56 olmuştur. 92 gün sülfürik asit etkisi sebebiyle en fazla basınç dayanımı azalması 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinde meydana gelirken, asitten en az etkilenen ise 95C5SF Geopolimer beton numuneleri olmuştur. 65C30U5SF Geopolimer betonlarda ise asit etkisinden dolayı meydana gelen dayanım azalması %37 olmuştur. 95C5SF numuneleri ile 65C30U5SF numuneleri karşılaştırıldığında sadece %6’lık bir basınç dayanım azalması farkı gözükmektedir. Dolayısıyla 65C30U5SF betonlarının da asite karşı çok iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmaktadır.



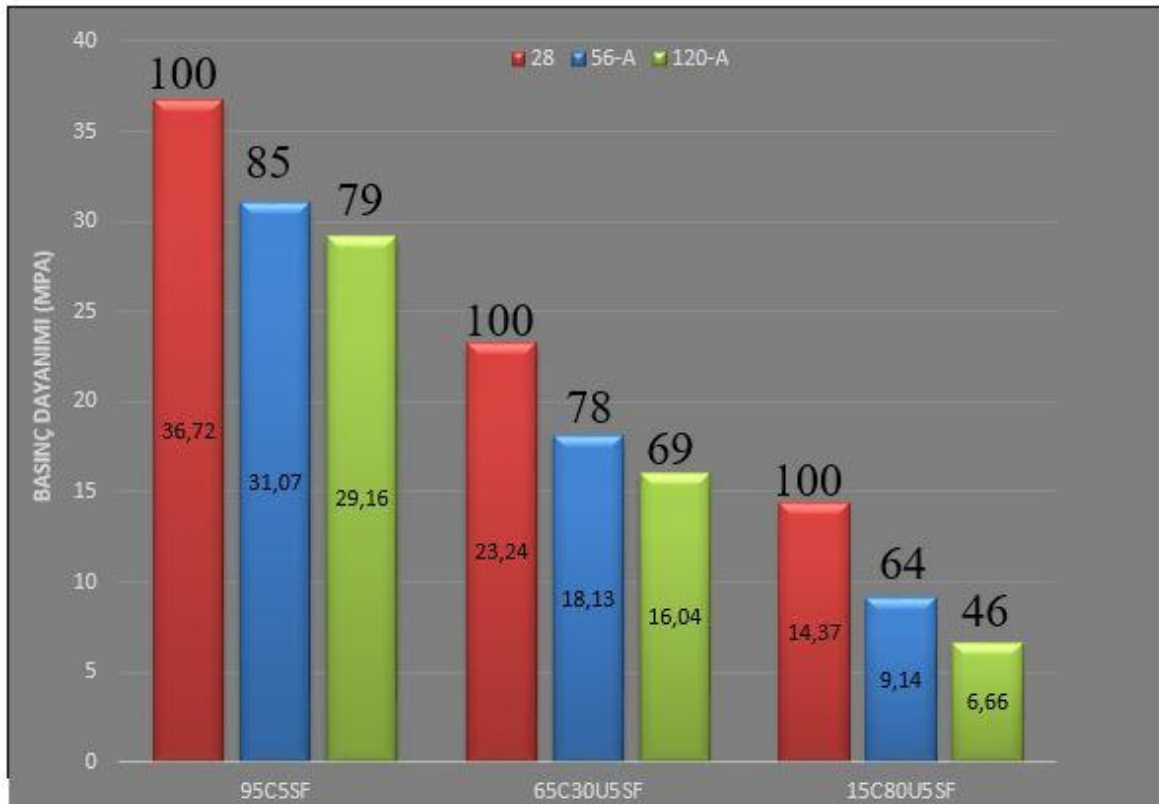
Şekil 22 Farklı ortamda bulunan numunelerin 120 günlük basınç dayanımları

Şekil 23’de ise 95C5SF, 65C30U5SF ve 15C80U5SF Geopolimer beton numunelerinin laboratuvar ortamında (kontrol) basınç dayanımlarının 28., 56., ve 120. günlerindeki zamanla değişimi verilmiştir. Sonuçlara göre 95C5SF numunelerinin 28., 56., ve 120. günlerdeki basınçlarındaki dayanımlar sırasıyla 36.72 MPa, 38.87 MPa, ve 42.14 MPa olmuştur. Bu numuneler incelendiğinde, 56. ve 120. günlerindeki basınçlarında oluşan dayanımların artışı ile 28. gündeki dayanımlarla karşılaştırıldığında sırasıyla % 6 ve % 15 olmuştur. 65C30U5SF numuneleri incelendiğinde, 28., 56., ve 120. günlerdeki basınç dayanımları sırasıyla 23.24 MPa, 24.64 MPa, 25.26 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu numunelerde görülen 56. ve 120. günlerdeki basınç dayanımlarındaki artış ise 28. gündeki dayanımlara göre sırasıyla % 6 ve % 9 olmuştur. 15C80U5SF numuneleri incelendiğinde, 28., 56., ve 120. günlerindeki basınç dayanımları sırasıyla 14.37 MPa, 14.84 MPa, 15.06 MPa olarak elde edilmiştir. Bu numunelerin 56. ve 120. günlerdeki basınç dayanımlarındaki artış ise 28. günündeki dayanımlara göre sırasıyla % 3 ve % 5 olmuştur. Basınç dayanımlarında en fazla artış yüksek fırın cürüflü Geopolimer betonda meydana gelirken, en fazla uçucu kül içeren numunelerdeki basınç dayanım artışı çok yavaş olmuştur. Yüksek fırın cürufunun ise hem basınç dayanımını hem de dayanım artış hızını arttırdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 23 Normal hava ortamında bulunan numunelerin basınç dayanımları

Şekil 24’de 56. ve 120. gün sonunda asit etkisine maruz kalan numunelerin 28.gün kontrol betonlarıyla beraber basınç dayanımı test sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre, 95C5SF numuneleri asit etkisine bırakılmış olup bu sebeple 56. ve 120. günlerindeki beton basınç dayanımları 28.güne göre % 15 ve % 21 azalmıştır. 65C30U5SF numunelerinin asit etkisi dolayısıyla 56. ve 120. günündeki beton dayanımlarının 28. güne göre % 22 ve % 31 azaldığı belirlenmiştir. 15C80U5SF numunelerinin asit etkisine bırakılmış olup bu sebeple 56. ve 120. günde beton dayanımları 28. güne göre % 36 ve % 54 azalmıştır. Sülfürik asit dolayısıyla en fazla azalma yüksek oranda uçucu kül kullanılan Geopolimer betonlarda olmuşken, en az azalma ise yüksek oranda yüksek fırın cürufu içeren numunelerde gerçekleşmiştir. Uçucu küldeki hidrate olmamış kül parçacıklarının geçirgenliğe sebep olmasından ötürü, basınç dayanımında çok fazla azalma meydana gelmiştir. Yüksek fırın cürufu numunelerde yüksek CaO miktarına rağmen numuneler asite karşı çok iyi performans sergilemişlerdir.



Şekil 24 Asit ortamında bulunan numunelerin basınç dayanımları



## 5.SONUÇLAR

Çalışmamızın amacı; günümüzde daha yeşil, daha çevreci ve atık malzemelerin kullanımı ile üretilen 3 farklı Geopolimer betonların dayanım ve durabilite performanslarının %5 sülfürik asit etkisinde incelenmesi ve bu Geopolimer betonların yapılarda kullanımı için Geopolimer betonların standartlaşmasına katkıda bulunmaktır. Bu sebeple üretilen Geopolimer betonların % 5 sülfürik asit etkisinde görsel denetim, ağırlık kaybı ve basınç dayanımında meydana gelen azalmalar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Numunelerin en dış yüzeyi görsel olarak incelendiğinde en fazla yüzey bozulmasının 15C80U5SF (% 80 uçucu kül içeren Geopolimer) numunelerinde, en az yüzey bozulmasının ise 95C5SF (% 95 yüksek fırın cürufu içeren Geopolimer) numunelerinde gerçekleşmiştir. Bozulmanın uçucu küllü numunelerde olmasının sebebi olarak hidrate olmamış uçucu kül parçaklarından kaynaklanması olarak gösterilebilir. Ayrıca, asit etkisiyle betonda meydana gelen bozulmanın zamanla arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- % 5 asit etkisinden kaynaklanan ağırlık azalması sonuçları da görsel denetim sonuçlarına benzer sonuçlar vermektedir. 120.gün (92 gün asit etkisi) sonunda 95C5SF numunelerinde ağırlık kaybı olmazken, 65C30U5SF numunelerinde % 0.44 ve 15C80U5SF numunelerinde %0.57 ağırlık kaybı gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, asit dolayısıyla numunelerin ağırlıklarında meydana gelen azalma zamanla artmaktadır.
- Asit etkisinden dolayı numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen azalmalar değerlendirildiğinde, en fazla basınç dayanımı azalmasının 15C80U5SF numunelerinde (% 56 azalma), daha sonra 65C30U5SF numunelerinde (% 37 azalma), en az dayanım kaybının ise 95C5SF numunelerinde (% 31 azalma) gerçekleşmiştir. Durabilite bakımından değerlendirildiğinde, 95C5SF ile 65C30U5SF numuneleri % 5 sülfürik asit etkisine karşı iyi bir performansa sahip olduğu ve bu iki betonun kimyasal etkilere maruz bölgelerde yapılacak yapılarda kullanabileceği önerilmektedir.

- Kontrol ortamında (normal yapılarda) basınç dayanımının gelişimi olarak bakıldığında ise, 95C5SF numuneleri ~42 MPa basınç dayanımına, 65C30U5SF numunelerinin ~25 MPa basınç dayanımına, 15C80U5SF numunelerinin ise ~15 MPa basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Çevresel ortamlarda kullanılacak kriterler olarak değerlendirildiğinde yani minimum  $360 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı malzeme kullanımı olarak ele alındığında, 95C5SF ve 65C30U5SF Geopolimer betonları, Portland çimentolu beton yerine yapısal elemanlarda kullanılabilirler.



## KAYNAKLAR

- [1] Statista, “United states and world cement production in 2010 and 2013.”, Online Available <http://www.statista.com/statistics/219343/cementproduction-worldwide/> Swa Nepoel, (04.03.2014).
- [2] V.M. Malhotra, Making concrete “greener” with fly ash, *Concr. Int.* 21 (1999) 61–66.
- [3] G.L. Golewski, T. Sadowski, The fracture toughness the KIIIc of concretes with F fly ash (FA) additive, *Constr. Build. Mater.* 143 (2017) 444–454, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.137>.
- [4] Motorwala, A., Shah, V., Kammula, R., Nannapaneni, P. & Raijiwala, D. (2008). “ALKALI Activated FLY-ASH Based Geopolymer Concrete,”.
- [5] Sakulich, A. (2011). “Reinforced Geopolymer Composites for Enhanced Material Greenness and Durability,” *Sustainable Cities and Society*. 1(4)
- [6] Alzeer, M. & MacKenzie, K.(2013). “Synthesis and Mechanical Properties of Novel Composites of Inorganic Polymers (Geopolymers) with Unidirectional Natural Flax Fibres (Phormium Tenax),” *Applied Clay Science*,76, 75–76.
- [7] Vijai, K., Kumutha, R. and Vishnuram, B. G. (2010). “Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete, ”*International Journal of the Physical Sciences*, 5, 1419–1423.
- [8] J. Davidovits, D.C. Comrie, J. Paterson, D.J. Ritcey, Geopolymeric concretes for environmental protection, *ACI Concr. Int.* (1990) 30–40.
- [7] Davidovits, J. (1994). “Properties of geopolymer cements on alkaline cements and concretes., ” *International conference*, 131–149.
- [8] Swamy, R. N. (1986). “Cement Replacement Materials, ” *Glasgow: Surrey University Press*, 3.
- [9] Wallah, S.E. and Rangan, B.V. (2006). “LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE : LONG-TERM By Faculty of Engineering Curtin University of Technology, ” *Research Report GC 2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia*.
- [10] Rajesh, A. M, Joe, M. A. and Mammen, R. (2014). “Study of the Strength Geopolymer Concrete with Alkaline Solution of Varying Molarity, ”*engineeringcivil.com*,4,19–24.
- [11] Deb, P. S., Nath, P. and Sarker, P. K. (2014). “The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature”*Materials and Design*, 62,32–39.

- [12] Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V.(2005). “Performance of Geopolymer Concrete Under Sulfate Exposure, ” Paper for Ed Nawy Symposium, American Concrete Institute.
- [13] “Slag Cement Association” Slag Cement. [http://www.slagcement.org/pdf/no1%20Slag %20Cement.pdf](http://www.slagcement.org/pdf/no1%20Slag%20Cement.pdf) South, (04.05.2016).
- [14] “Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri” [http://www.imo.org.tr / resi m l e r/ekutuphane/pdf/3999.pdf](http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3999.pdf), (12.04.2008).
- [15] “Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi” [http://www.imo.org.tr/ resimler/ ekut up ha ne/pdf/241.pdf](http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/241.pdf), (05.04.2003).
- [16] Provis, J.L. and J.S.J. van Deventer.(2009). “Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications” Woodhead Cambridge, UK.
- [17] Aitcin, P.(2008). “Binders for Durable and Sustainable Concrete” ISBN 0- 203-94048-2-Master e book,10.
- [18] Douglas, E and Zebino, R. (1986). “Characterisation of Granulated and Pelletized Blast- furnace Slag” Cement and Concrete Research, retrieved from [http//www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 16, 662–670.
- [19] Cook, DJ. Hinczak, I. and Cao, HT. (1987). “Heat of Hydration, Strength, and Morphological Development in Blast-furnace/Cement Blends” International Workshop on Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete, Toronto, Canada.
- [20] Krivenko, P. D. (1994). “Alkaline cements” Paper presented at the first international conference on alkaline cements and concrete, Kiev, Ukraine, 1114 October.
- [21] Price, W. H., “Pozzolans - A Review,” Journal of the American Concrete Institute, May 1975, pp.225-234.
- [22] Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W. and Davis, H. E., “Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash,” ACI Journal, Proceedings, V.33, No.5, May-June 1937, pp.577-612.
- [23] TS EN 450, 1998, Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler Ve Kalite Kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [24] ACI Committee 207, “Mass Concrete,” ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1994, pp.207. IR-1 to 207. IR-44.
- [25] Şengül Ö., Taşdemir M. A. ve Sönmez R., 2003, “Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal Ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği”, V. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul S.75-76
- [26] Tokyay, M., 1993, Betonda Uçucu Kül Kullanımı Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, Türkiye, S26-36

- [27] Malhotra, V.M., Mehta, P.K., 2002, High Performance, High Volume Fly Ash Concrete 101 s. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa.
- [28] A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan, G. Yılmaz, Ö. Ariöz, K. Ramyar, Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of selfconsolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1020–1025.
- [29] D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal, Structural performance of nano-silica modified flyash based geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 430–439, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.111>.
- [30] Malhotra, V. M. and Carette, G. G. “Silica Fume Concrete - Properties, Applications, and Limitations,” *Concrete International*, ACI, May 1983, pp.40-46.
- [31] Mehta, P. K., “Condensed Silica Fume,” *Cement Replacing Materials*, Vol.3, Surrey University Press, 1986, pp.136, 137.
- [32] Malhotra, V. M., Carette, G. G. and Sivasundaram, V., “Role of Silica Fume in Concrete: A Review,” *Advances in Concrete Technology*, CANMET-Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 1992, pp.925- 991.
- [33] Palomo A, Grutzeck, M.W. & Blanco, M.T. (1999). “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future” *Cement And Concrete Research*, 29, 1323– 1329.
- [34] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. & Jalali, S. (2008). “Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products” *Construction and Building Materials*, 22.
- [35] Ekmen Ş., Mermerdaş K. (2018). “Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 93-101.
- [36] Shi, C. and Qian, J. (1999). “High Performance Cementing Materials from Industrial Slags” *Resources, Conservation and Recycling*, 195–207.
- [37] Davidovits, J.(2008). “Scientific tools, X-rays, FTIR, NMR. In J. Davidovits(ed) *Geopolymer. Chemistry and applications*, ” Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France., 61–76.
- [38] Taylor, H. F. W. (2003). “Cement Chemistry, Second Edition” Published by Thomas Telford publishing, Thomas Telford services ltd, 1 Heron Quay, London E144JD.
- [39] Palomo A, Blanco-Varela MT, Granizo ML, Puertas F, Vasquez T, Grutzeck MW.(1999). “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin” *Cement and Concrete Research*, 29, 997–1004.
- [40] Davidovits J, Comrie DC, Paterson JH, Ritcey DJ.(1990). “Geopolymeric concretes for environmental protection” *Concrete International: Design and Construction*, 12,30–40.

- [41] Bakharev T, Sanjayan J.G, Chen B.(2003). “Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack” *Cement and Concrete Research*, 33(16),7–11.
- [42] Song X.J, Marosszeky M, Brungs M, Munn R.(2005). “Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. ” 10 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17- 20 April.
- [43] Gourley, J.T. and Johnson, G.B. (2005). “Developments in Geopolymer Precast Concrete,” Paper presented at the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete, Perth, Australia.
- [44] Pacheco-Torgal F, Gomes J, J. S.(2010). “Durability and environmental performance of alkali-activated tungsten mine waste mud mortars., ” *J Mater Civil Eng*, 22, 897–904.
- [45] Liu PC. (1991). “Damage to concrete structures in a marine environment” *Materials and Structures*, 24, 302–307.
- [46] Bassuoni, M. T. and Nehdi, M. L.(2009). “Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading” *Cement and Concrete Research*. 39, 206–226.
- [47] Hakkinen, T. (1987). “Durability of alkali-activated slag concrete” *Construction and Building Materials journal*, 6, 81–94.
- [48] Mehta, P. (1993). “Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete – a critical review, Proc” 1st Int. Conf. Use fly ash, silica fume, slag other Miner. by- Prod. Concr. ACI SP-79, Am. Concr. Institute, Detroit, 1–48.
- [49] Olivia, M. and Nikraz, H. (2013). “Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete in Seawater” *Cement and Concrete Research*.
- [50] Rangan, B. V.(2008). “FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE” Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- [51] (2014), <https://www.sanalsantiye.com/rotre-nedir-rotre-catlagina-karsi-alinacak-onlemler/#.XahZjegzaUk>
- [52] (2015), <https://prezi.com/pj-pwewj9bhl/alkali-agrega-reaksiyonu/>
- [53] Wang. K, Shah. S, Mishulovich. A. (2004). “Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKDfly ash binders” *Cement and Concrete Composites*, 34, 299–309.
- [54] Poon, C., Azhar. S, Anson,M., Wong.Y. (2003). “Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures” *Cement and Concrete Composites*, retrieved from <http://www.sciencedirect.com>, 25, 83–89.
- [55] Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A., Chindaprasirt, P. (2006). “Synthesis of High Calcium Fly Ash and Calcined Kaoline Geopolymer Mortar. ” *Int. Conf. Pozzolan, Concr. Geopolymer*, Khhon Kaen, Thailand, May24-25.

- [56] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G. and Sagoe-Crentsil, K.(2008). “Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures.” *Cement Concrete Composites*, 30, 986–991.
- [57] Barros, J. A. O and Cruz, J. S. (2001). “Fracture Energy of Steel Fiber Reinforced Concrete” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 8, 29–45.
- [58] Hillerborg, A. (1985). “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy  $G_f$  of Concrete,” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 18, 291–296.
- [59] F. (Draft R. R. T. 50. (1985). “Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams,” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 18, 285–290.
- [60] Hillerborg, A. (1985). “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy  $G_f$  of Concrete,” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 18, 291–296.
- [61] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. & Rangan, B. V. (2004). “on the development of fly ash-based geopolymer concrete,” *ACI Materials Journal*, 101, 6.
- [62] Bharatkumar, B.H, Raghuprasad, B.K, Ramachandramurthy, D.S, Narayanan, R, Gopalakrishnan, S.(2005). “Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete,” *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 38, 63–72.
- [63] Carpinteri A, B. R.(2010). “Fracture behavior of plain and fibre-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading,” *Mater Des*, 32–42.
- [64] Yacob, N. S., ElGawady, M. A., Sneed, L. H., & Said, A. (2019). Shear strength of fly ash-based geopolymer reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 196, 109298.
- [65] Tran, T. T., Pham, T. M., & Hao, H. (2019). Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with steel fibers. *Engineering Structures*, 200, 109707.
- [66] Gunasekara, C., Law, D., Bhuiyan, S., Setunge, S., & Ward, L. (2019). Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 200, 502-513.
- [67] Khan, M. Z. N., Hao, Y., & Hao, H. (2019). Mechanical properties and behaviour of high-strength plain and hybrid-fiber reinforced geopolymer composites under dynamic splitting tension. *Cement and Concrete Composites*, 103343.
- [68] S. Kumaravel and K. Girija, “Acid and salt resistance of geopolymer concrete with varying concentration of NaOH,” *J. Eng. Res. Stud.*, vol. 4, no. 4, pp. 1–3, 2013.
- [69] D. Hardjito, S.E.Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V.Rangan, “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”, *ACI materials Journal*, Technical paper, Title No.101M52, 2004.

## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : İsmail Erhan KALAYCIKLI  
 Uyuşu : T.C  
 Doğum Tarihi ve Yeri : 25.12.1994 Bahçelievler/İstanbul  
 Medeni Hali : Bekar  
 Telefon : 0 537 507 36 25  
 E-Mail : erhankalayckl@gmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	İ.G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnş. Müh.A.B.D.	2019
Lisans	İstanbul Gelişim Üniversitesi İnşaat Mühendisliği	2017
Lise	Kemal Hasoğlu Lisesi	2013

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görevi
2017-	İBB İSTANBUL ENERJİ AŞ	İnşaat Mühendisi
2016	Akmeşe Yapı	İnşaat Stajyeri
2015	Mata Yapı	İnşaat Stajyeri

### Sertifikalar

Sta4CAD, Microsoft Office, AMP Kurumsal Metraj, Hakediş ve Yaklaşık Maliyet, Temel Proje Yönetimi, Hitabet ve Sunum Teknikleri, Bireysel ve Kurumsal İletişim Eğitimi, Yazışma Kuralları Eğitimi

### Yabancı Dil

İngilizce





*ĞELİŐİM ĞELİŐMEKTİR...*

